

# **Análise Espacial das Mineralizações de Antimónio em Relação com Magmatismo Básico Filoniano e outras Características Geológicas no Distrito Auri – Antimonífero Dúrico - Beirão**

**Adriana Filipa Batista**

Mestrado em Geologia

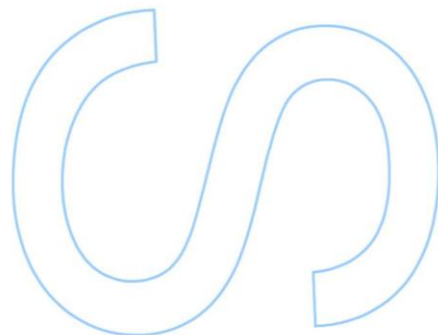
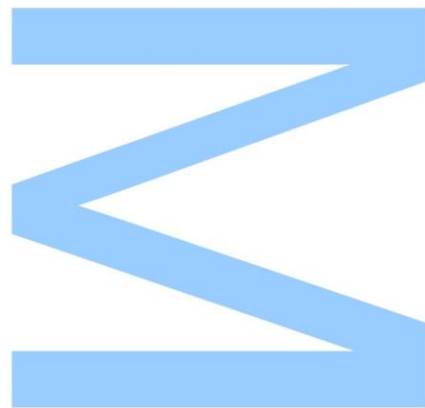
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento de Território  
2016

## **Orientador**

Alexandre Martins Campos de Lima, Professor Auxiliar, Faculdade de  
Ciências da Universidade do Porto

## **Coorientador**

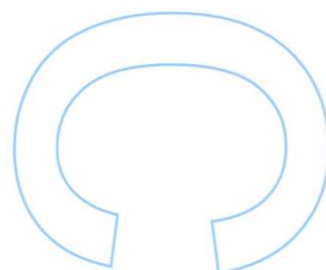
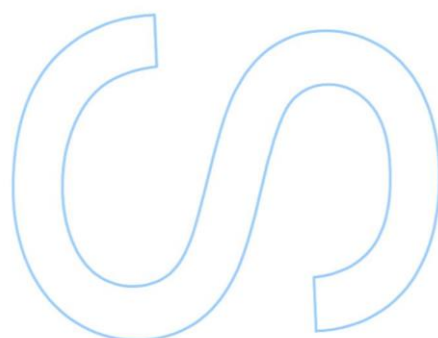
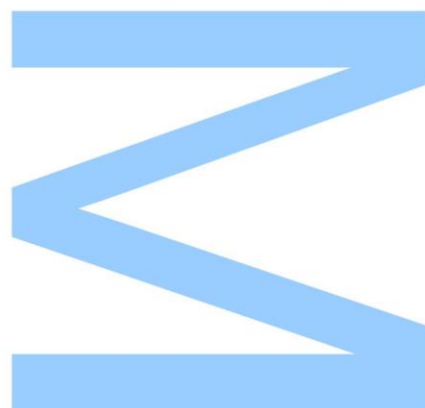
Helena Maria Sant'Ovaia Mendes da Silva, Professor Associado com  
agregação, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto





Todas as correções determinadas  
pelo júri, e só essas, foram efetuadas.  
O Presidente do Júri,

Porto, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Alexandre Lima pelo apoio e interesse demonstrado, pela a sua disponibilidade, também pela paciência, motivação e ajuda que me prestou ao longo do ano. A minha gratidão e sincero reconhecimento por aquilo que fez por mim.

À Professora Helena Sant'Ovaia por todos os conhecimentos transmitidos, pelo apoio, colaboração e disponibilidade para auxiliar no desenvolvimento desta dissertação.,

A minha amiga Sara, o meu profundo agradecimento por toda a ajuda, paciência, apoio, conselhos e ensinamentos transmitidos durante a realização desta dissertação.

A Patrícia por todo o conhecimento transmitido e por todo o apoio e paciência, um obrigada.

A minha amiga e “colega de campo” Cátia pela sua disposição em acompanhar-me e ajudar-me no trabalho de campo, pelas nossas aventuras, por toda a amizade e por todo o conhecimento que me transmitiste, um obrigada.

Aos meus amigos Marina, Maria, Jethro e Joana por me apoiarem na realização deste trabalho e me acompanharem ao longo destes 5 anos, sem vocês não era a mesma coisa, o meu sincero agradecimento e amizade.

Ao meu namorado, Ricardo, por todos os momentos em que me apoiaste sem nunca duvidar das minhas capacidades, por todos os conhecimentos partilhados e por tudo que és. Obrigada por estares sempre ao meu lado.

Aos meus afilhados, Fernando, Hélder e Ângelo, por me apoiarem e acreditarem sempre em mim, um obrigada.

À minha família pelo apoio incondicional, amor, confiança, esforço e compressão ao longo de todo este percurso académico.

E a todos que me acompanharam neste percurso evolutivo, pessoal e profissional, um muito obrigada.





## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal destacar qualquer potencial relação espacial entre antigas minas de antimónio e antimónio-ouro, filões básicos e outras características geológicas no Distrito Dúrico - Beirão.

O Distrito Dúrico – Beirão tem uma extensão de cerca de 90km, entre a Lagoa Negra (Esposende) a Gafanhão (Castro Daire), geologicamente, corresponde ao Anticlinal de Valongo, com direção NW-SE, cujo eixo mergulha 5 a 15° para NW, com um plano axial inclinado 60° para NE. O flanco normal apresenta uma extensão de 20 km e uma inclinação de 35° para NE, por outro lado, o flanco inverso é muito mais inclinado e prolonga-se 50 km para sul e é aproximadamente sub-vertical.

Diferentes metodologias de trabalho foram utilizadas para a elaboração desta dissertação, nomeadamente, análise estatística da distribuição espacial dos filões básicos, minas antimónio e antimónio-ouro e outras características geológicas; medição de suscetibilidade magnética dos filões básicos e levantamento magnético de estruturas mineralizadas em antimónio e ouro.

As análises estatísticas sobre a distribuição espacial das ocorrências de filões básicos e antigas minas de antimónio, a distância do vizinho mais próximo, mostrou que os filões e as minas de antimónio na área de estudo estão colocados segundo uma distribuição *cluster*. Comparando as duas razões R é possível concluir que as minas de antimónio (0,55) apresentam um grau de agrupamento, diminutamente, maior que os filões básicos (0,59).

Os valores da suscetibilidade magnética, foram medidos *in situ* com auxílio de um suscetibilímetro portátil em filões básicos, que afloram na zona em estudo. Os valores registados encontram-se compreendidos entre 298,88 e 1658,75 x 10<sup>-6</sup> SI, evidenciando um comportamento paramagnético a ferromagnético para as rochas básicas em estudo.

O levantamento magnético permitiu verificar a existência de dois alinhamentos no norte da área de estudo (Lagoa Negra – Rates) de orientação NW-SE, sendo coincidente com a orientação de uma estrutura mineralizada já referida em Leal *et al.* (2015).

A análise de distância entre características geológicas corroborou uma relação espacial entre minas de Sb e Sb-Au e filões básicos, bacias anómalas de antimónio e filões básicos.

## **PALAVRAS CHAVE**

Relação espacial, filões básicos, mineralizações de antimónio, levantamento magnético.

## ABSTRACT

This study aimed to highlight any potential spatial relationship between antimony and antimony-gold old mines, basic veins and other geological features in the District Dúrico - Beirão.

The District Dúrico - Beirão has a length of about 90km, between the Lagoa Negra (Braga) to Gafanhão (Castro Daire), geologically, corresponds to Valongo anticline with NW-SE orientation, whose axis plunges 5 to 15 to NW, with an axial plane inclined 60° to NE. The normal flank has a length of 20 km and a 35 ° inclination to NE, on the other hand, reverse flank is more inclined and extends 50km to south and is approximately sub-vertical.

Different methodologies were used in the preparation of this work in particular statistical analysis of spatial distribution of basic veins, mines antimony and antimony-gold and other geological features; magnetic susceptibility measurement of basic veins and magnetic survey of mineralized structures in antimony and gold.

The statistical analysis of the spatial distribution of basic veins occurrences and old mines of antimony, the distance from the nearest neighbor, showed that the basic veins and mines of antimony, in the study area, are placed according to cluster distribution. Comparing the two ratios R is possible to conclude that the antimony mines (0.55) have a larger grouping than the basic veins (0.59).

The values of magnetic susceptibility were measured in situ with the aid of a portable susceptibility meter in basic veins which outcrop in the area under study. Registered values are ranging between 298.88 and 1658.75 x 10<sup>-6</sup> SI, showing a behavior paramagnetic to ferromagnetic.

The magnetic survey has shown the existence of two alignments in the north of the study area (Lagoa Negra - Rates) NW-SE orientation, the alignment coincident with the orientation of a mineralized structure cited in Leal *et al.* (2015).

Analysis distance between geological features revealed a spatial relationship between antimony and antimony-gold mines and basic veins, anomalous antimony basins and basic veins.

## KEY-WORDS

Spatial relationship, basic veins, mineralized antimony, magnetic survey.



## ÍNDICE

1.1 Objetivos.....	2
1.2 Estrutura da Dissertação .....	3
2. Enquadramento da Área de Estudo .....	6
2.1 Enquadramento Geográfico e Geomorfológico .....	6
2.2 Enquadramento Geotectónico .....	8
2.3 Cartografia Geológica .....	9
2.4 Enquadramento Geológico .....	10
2.4.1 Estratigrafia/Paleozóico.....	11
2.4.2 Metamorfismo .....	16
2.4.3 Granitóides.....	17
2.4.4 Filões e Massas .....	17
2.4.5 Recursos Minerais.....	17
2.4.6 Depósitos Modernos .....	18
3. Mineralizações de Antimónio.....	20
3.1 Mineralogia e Génese.....	20
3.2 Ocorrências no Norte de Portugal.....	21
3.3 Teores, Produções e Reserva de Antimónio.....	26
3.4 Aplicações do Antimónio.....	27
4 Magmatismo Básico Filoniano: Doleritos e Diabases .....	30
4.1 Mineralogia e Génese.....	30
4.2 Dolerito ou Diabase .....	31
4.3 Filões Básicos no Distrito Dúrico Beirão .....	31
4.4 Trabalho de Campo .....	33
4.4.1 Filão 1 .....	34
4.4.2 Filão 2 .....	34
4.4.3 Filão 3 .....	35
4.4.4 Filão 7A e 7B.....	35

4.4.5 Filão 9 .....	36
4.4.6 Filão 11A e 11B.....	36
4.4.7 Filão 15 .....	37
4.4.8 Filão 16 .....	37
4.4.8 Filão 20a e 20b .....	38
5. Análise Magnética.....	40
5.1 Introdução.....	40
5.2.1 Declinação Magnética .....	41
5.2.2 Inclinação Magnética.....	43
5.2.3 Intensidade do CMT .....	43
5.3 Propriedades Magnéticas .....	45
5.3.2 Suscetibilidade Magnética.....	46
5.3.3 Diferentes estados magnéticos .....	47
5.4 Magnetismo das rochas e Minerais.....	49
5.5 Anomalias Magnéticas.....	52
5.6 Redução e Correção de dados .....	53
5.6.1 Variação Secular .....	53
5.6.2 Variação Diurna .....	53
5.6.4 Variação de Elevação e Terreno .....	54
5.8 Métodos e Metodologias.....	55
5.8.1 Suscetibilímetro.....	55
5.8.2 Magnetómetro .....	57
6. Análise Espacial.....	62
6.1 Introdução.....	62
6.2 Aquisição de Dados.....	64
6.2.1 Layer minas de antimónio e antimónio-ouro.....	65
6.2.2 Layer Litologia.....	66
6.2.3 Layer de Falhas e cavalgamentos.....	67
6.2.4 Layers Filões de quartzo, filões de dolerito e filões de aplito-pegmatito ..	68

6.2.5 Layer de Sedimentos de Corrente.....	69
6.2.6 Layers de Concentrados de Bateia .....	70
6.2.7 Layer Bacias de drenagem obtidas através de sedimentos de corrente ..	71
6.3. Análise Espacial .....	77
6.3.1. Distância ao Vizinho mais Próximo (DNN).....	77
6.3.2. Distribuição Espacial da Densidade .....	79
6.3.3. Método de Distribuição da Distância .....	80
7. Resultados .....	84
7.1 Análise Magnética .....	84
7.1.1 Suscetibilímetro.....	84
7.1.2 Magnetómetro .....	87
7.2 Análise Espacial .....	92
7.2.1 Distância ao Vizinho mais próximo .....	92
7.2.2. Distribuição Espacial da Densidade .....	94
7.2.3 Distribuição Espacial da Distância.....	96
8. Considerações Finais.....	103
9. Referências Bibliográficas .....	105

**X**

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Análise Espacial das Mineralizações de Antimónio em relação com o Magmatismo Básico

Filoniano e outras características geológicas no Distrito Auri – Antimonífero Dúrico - Beirão



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. ....	6
Figura 2 – Mapa das grandes zonas geotectónicas e estruturas maiores, Carta Geológica de Portugal 1:1000000 (Duarte & Santos, 2010) .....	8
Figura 3 - Localização da área em estudo nos mapas cartográficos existentes. a) Divisão cartográfica de Portugal, na escala 1/500 000 ( <a href="http://www.lneg.pt/servicos/139/">http://www.lneg.pt/servicos/139/</a> ); b) Divisão cartográfica de Portugal na escala 1/50 000 ( <a href="http://www.lneg.pt/servicos/127/">http://www.lneg.pt/servicos/127/</a> ) .....	9
Figura 4 - Perfil Geológico na folha 9-D (Penafiel) da Carta Geológica dos Serviços Geológicos de Portugal na escala de 1/50 000, onde se pode visualizar o Anticlinal de Valongo (Couto, 1993) .....	10
Figura 5 – Geologia área de estudo, 1 - Quaternário; 2 - Carbonífero; 3 - Ordovícico a Devónico; 4 - Precâmbrico e/ou Câmbrico?; 5 – Granito de duas micas 6 – Granito biotítico.(Couto et al., 2007) .....	11
Figura 6 – Mapa Geológico simplificado do NE de Portugal, localização do Distrito de Bragança e dos depósitos de antimónio desse (adaptado de Serviços Geológicos de Portugal, 1992 in Neiva et al., 2008). ....	22
Figura 7 – Mapa Geológico da Região Dúrico – Beirã e localização dos depósitos de Sb – Au, adaptado de Couto, 1990 in Neiva et al., 2008.....	23
Figura 8 – Sucessão paragenética e evolução geoquímica das mineralizações de Ribeira da Igreja (Sb - Au) (Couto , 1993) .....	25
Figura 9 – Relação entre granulometria das rochas ígneas e o seu contexto geológico, à direita encontra-se o conceito tradicional e à esquerda o conceito atualizado (Unidade curricular Petrologia I: Descrição Petrográfica da rochas ígneas do Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea da Universidade do Estado do Rio de Janeiro).....	30
Figura 10 – Diagrama de rosetas com a orientação preferencial dos filões básicos. ....	32
Figura 11 - Mapa de reconhecimento e localização dos filões básicos da área de estudo. Datum WGS84_UTM29N. ....	33
Figura 12 –Filão 2, marcado com linha preta a tracejado, e a rocha encaixante, os micaxistos. ....	34
Figura 13 - Filão 3, marcado a linha preta tracejada, encaixado em xistos muito alterados e amarelados.....	35
Figura 14 – Filão 9, circunscrito a linha preta tracejada, encaixado em metassedimentos. ....	36

Figura 15 - Amostra de filão básico fresco da parte inferior do filão 16. ....	37
Figura 16 - Filão 16, delineado a linha preta tracejada, encaixando em intercalações de xisto e quartzito. ....	37
Figura 17 - Filões básicos 20A e 20B, marcados com linha de cor preta a tracejado, encaixando em intercalações de xistos e quartzitos. ....	38
Figura 18 - Campo Magnético Terrestre simplificado. (Buchanan, et al., 2013 in Correia, 2011) .....	41
Figura 19 – Mapa da Declinação Magnética do Campo Magnético Principal. Intervalo de curvas: 2º. Curvas a vermelho, declinação positiva; a azul, negativo e verde valores nulos (World Magnetic Model). ....	42
Figura 20 – Mapa de Inclinação Magnética do Campo Magnético terrestre. Intervalo de curvas: 2º. Curvas a vermelho, declinação positiva; a azul, negativo e verde valores nulos (World Magnetic Model). ....	43
Figura 21 – Mapa de Intensidade Magnética do Campo Magnético Terrestre principal. Intervalo de curvas 1000nT (World Magnetic Model). ....	44
Figura 22 - Diferentes estados magnéticos quando aplicado um campo magnético e após a remoção do mesmo (Extraído de Tarling & Hrouda, 1993 in Correia, 2011). ....	47
Figura 23 – Variação da Suscetibilidade nos diferentes tipos de rocha e minerais (Extraído de Dentith & Mudge, 2014) .....	50
Figura 24 - Susceptibilímetro Magnético KT-10 Terraplus. Fonte: <a href="http://hasahill.com.br/wp-content/uploads/2013/02/KT-10_Plus_Magnetic_Susceptibility_Meter_The_Coretray_Company-700x300.jpg">http://hasahill.com.br/wp-content/uploads/2013/02/KT-10_Plus_Magnetic_Susceptibility_Meter_The_Coretray_Company-700x300.jpg</a> .....	55
Figura 25 - Magnetómetro de protões DeepGeoTech, á direita o sensor com cabo e à esquerda o painel de instrumentos. (Olsen 2013) .....	58
Figura 26 – Variação do Campo Magnético ao longo do dia entre as 10h e as 16h do dia 24 de Maio. ....	60
Figura 27 - Layer das minas de antimónio e antimónio e ouro. Datum WGS84 29N65	
Figura 28 - Layer litologia. Datum WGS84 29N. ....	66
Figura 29 - Layer de falhas e cavalgamentos. Datum WGS84 29N. ....	67
Figura 30 - Layers de filões de quartzo a amarelo, filões de aplito pegmatito a vermelho e filões básicos a rosa. Datum WGS84 29N .....	68
Figura 31 - Layer dos Sedimentos de corrente (1673 amostras). Datum WGS84 29N .....	69
Figura 32 - Layer dos Concentrados de bateia, a verde a estibina, amarelo o ouro e a vermelho a arsenopirite. Datum WGS84 29N. ....	70
Figura 33 - Modelo digital de escoamento. Datum WGS84_UTM29N. ....	71

Figura 34 - Modelo de Acumulação de fluxo. Datum WGS84_UTM29N.....	72
Figura 35 - Linhas de água (Set Null). Datum WGS84_UTM29N. ....	73
Figura 36 - Bacias em formato vetorial. Datum WGS84_UTM29N. ....	74
Figura 37 – Bacias em formato vetorial (polígonos) com os teores de antimónio. Datum WGS84_UTM29N. ....	75
Figura 38 – Bacias em formato vetorial (polígonos) com os teores de ouro. Datum WGS84_UTM29N. ....	76
Figura 39 - Tipos básicos de padrões espaciais de conjunto de pontos: aleatoriedade espacial completo, cluster e regular e a razão R. (Adaptado Carranza, 2009b) .....	77
Figura 40 - Histograma com as diferentes distribuições de referências, Distribuição Normal (ND) e Distribuição Alta Anormal (HAD) (Deveaud et al., 2013).....	81
Figura 41 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 1.....	85
Figura 42 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 2.....	85
Figura 43 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 3.....	85
Figura 44 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 7a.....	85
Figura 45 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 7b.....	85
Figura 46 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 9.....	85
Figura 47 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 11a.....	86
Figura 48 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 11b.....	86
Figura 49 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 15.....	86
Figura 50 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 16.....	86
Figura 51 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 20.....	86
Figura 52 – Projeção de todas as medidas de campo magnético efetuadas na parte norte da área de estudo, Lagoa Negra-Rates. ....	87

Figura 53 – Mapa de interpolação de dados, kriging, realizado depois da remoção de ruidos.....	88
Figura 54 - Mapa com o kriging projetado e os perfis 1,2, cortando as anomalias e os respetivos gráficos. ....	89
Figura 55 – Mapa com o kriging projetado da parte norte da área (Lagoa Negra) evidenciando um alinhamento N160º.....	90
Figura 56 – Mapa com o kriging projetado da parte sul da área (Rates) evidenciando um alinhamento N160º.....	91
Figura 57 – Mapa dos resultados de VLF, Resistividade e Campanha de solos e direção da estrutura possível inferida (Leal et al., 2016). ....	91
Figura 58 – Sumário da distância média ao vizinho mais próximo dos filões básicos.....	92
Figura 59 - Sumário da distância média ao vizinho mais próximo das minas de Sb e Sb-Au.....	93
Figura 60 - Mapa de densidade das minas de Sb e Sb-Au (minas por quilómetro quadrado) na área de estudo. ....	94
Figura 61 - Mapa de densidade dos filões básicos (filões por km <sup>2</sup> ) na área de estudo. ....	95
Figura 62 - Histograma representando a análise da distância das minas de Sb e Sb-Au e os filões básicos. ....	96
Figura 63 - Histograma representando a análise da distância das Bacias Anómalas em Sb e os filões básicos.....	97
Figura 64 - Histograma representando a análise da distância das minas de Sb e Sb-Au, bacias anómalas em Sb e os filões básicos. ....	98
Figura 65 - Histograma representando a análise da distância das minas de Sb e Sb-Au e as falhas. ....	99
Figura 66 - Histograma representando a análise da distância dos filões básicos e as falhas. ....	100
Figura 67 - Histograma representando a análise da distância das minas de Sb e Sb-Au e os filões de quartzo.....	101

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico – químicas do Antimónio. ....	20
Tabela 2 - Teores médios de antimónio (ppm) na crosta continental, em vários tipos de rocha, água do mar e solos (Bettencourt et al., 2005; Buttermann, 2004) .....	26
Tabela 3 - Medições de Suscetibilidade recolhidas através do suscetibilímetro portátil no campo (K expresso em $10^{-6}$ SI). ....	112



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 OBJETIVOS

### 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho constitui a tese de dissertação de título “Análise espacial das mineralizações de antimónio em relação com magmatismos básico filoniano e outras características geológicas no Distrito Auri – Antimonífero Dúrico - Beirão”, inserida no Mestrado em Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, incluída no plano curricular 2014/2015, incluída no plano curricular 2015/2016, sendo orientador da mesma a Doutor Alexandre Lima com coorientação da Doutora Helena Sant’ Ovaia.

### 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos da Dissertação são:

- Colocar em evidência qualquer ligação espacial potencial entre antigas minas de antimónio e antimónio-ouro e filões básicos na área de estudo e outras estruturas geológicas como por exemplo, falhas, bacias de drenagem, entre outras).
- Identificar anomalias geofísicas (magnéticas) particulares onde os depósitos de antimónio e filões básicos se encontram potencialmente agrupados e avaliar a afinidade com diferentes objetos geológicos.
- Caracterizar os filões básicos presentes na área de estudo, recorrendo à medição da suscetibilidade magnética.
- Realizar um levantamento magnético na parte norte da área (Lagoa Negra – Rates) com o intuito de identificar estruturas associadas com mineralização de ouro e antimónio regional.
- Comparar métodos geofísicos diferentes para locais e contextos distintos.



## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho desenvolvido encontra-se estruturado em capítulos, separando as diferentes áreas de estudo abordadas.

O Capítulo 1 aporta uma breve introdução, explicação dos objetivos definidos e o planeamento do trabalho estabelecido.

No Capítulo 2 encontra-se o enquadramento geral da área de estudo que se inicia com uma localização geográfica, enquadramento geotectónico e por fim o enquadramento geológico da área de estudo, onde é realizada uma breve descrição das características estratigráficas, tectónicas, metamórficas e magmáticas. No final do capítulo faz-se uma breve descrição das mineralizações do local de estudo, dando ênfase às mineralizações de antimónio e ouro.

No Capítulo 3 são referidas múltiplas particularidades das mineralizações de antimónio, evidenciando a sua mineralogia e génese; ocorrência no norte de Portugal; teores, produções e reservas e as suas aplicações

No Capítulo 4 são abordados conceitos fundamentais e características gerais de filões básicos (diabases e doleritos) da área de estudo, e é feita uma descrição de campo dos 11 filões estudados.

O Capítulo 5 é dedicado à análise das características magnéticas, onde são referidos alguns conceitos básicos como o campo magnético terrestre, intensidade magnética, declinação magnética, entre outros. Para além disso abordam-se os conceitos do magnetismo (magnetização, suscetibilidade magnética e estados magnéticos), magnetismo das rochas e minerais e anomalias magnéticas e correções usadas neste tipo de estudo. Também são apresentados os equipamentos utilizados (suscetibilímetro e magnetómetro) e o tratamento dos dados.

O Capítulo 6 inicia-se com uma breve introdução da metodologia de análise espacial (SIG), descrição de aquisição de todos os dados (*layer* de minas de Sb e Sb/Au, Filões, Falhas, entre outras), métodos e técnicas usados nesta análise (Distância ao vizinho mais próximo, Densidade de Kernel, Método de Distância).

Os resultados das diferentes análises realizadas neste trabalho são apresentados e interpretados no Capítulo 7, começando com a análise magnética e terminando com a análise espacial.

Para finalizar, o Capítulo 8 é dedicado às conclusões dos resultados obtidos e discutidos nos capítulos anteriores.

# CAPÍTULO 2

## ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

### 2.2 ENQUADRAMENTO GEOTECTÓNICO

### 2.3 CARTOGRAFIA GEOLÓGICA

### 2.4 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

## 2. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo inicia-se com uma localização geográfica, enquadramento geotectónico e por fim o enquadramento geológico da área de estudo. Também se apresenta uma breve descrição das características estratigráficas, metamórficas e magmáticas, onde está inserida a área de estudo. No final do capítulo faz-se uma breve descrição das mineralizações do local de estudo, dando particular ênfase às mineralizações de antimónio e ouro.

### 2.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E GEOMORFOLÓGICO

A área em estudo encontra-se no Distrito auri-antimonífero Dúrico-Beirão, localizado a NE do Porto, estendendo-se ao longo de uma faixa com orientação NW-SE, abrangendo os concelhos de Barcelos, Póvoa do Varzim, Vila do Conde, Trofa, Santo Tirso, Valongo, Paredes, Gondomar, Penafiel, Castelo de Paiva, Arouca, São Pedro do sul, Castro Daire localizados nos distritos, Braga, Porto, Aveiro e Viseu (Figura 1).

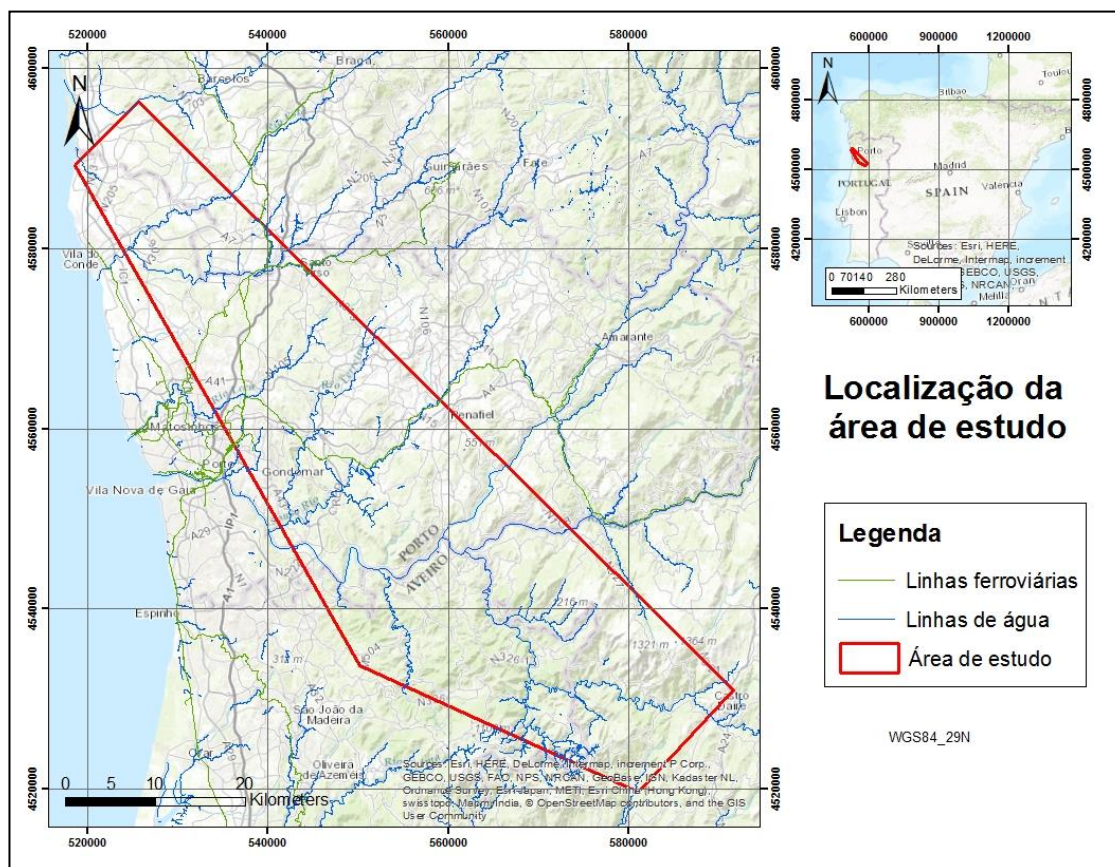


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

Esta faixa tem uma extensão de cerca de 90 km, desde a Lagoa Negra, que se encontra no NW de Portugal situada no distrito de Braga, do concelho de Barcelos da freguesia de Barqueiros, até Gafanhão localizado no distrito de Viseu, do concelho de Castro Daire.

A área encontra-se abrangida pelas folhas nº 82, 83, 96, 97, 111, 112, 123, 124, 134, 135, 144, 145 da carta militar de Portugal à escala 1:25 000 do Instituto Geográfico do Exército (IGOE).

Em termos geomorfológicos, a pluralidade da área de estudo não se encontra muito acidentada, tratando-se de uma zona com fracos relevos cortada por linhas de água. Os relevos presentes estão relacionados em grande parte com rochas quartzíticas do Ordovícico, nomeadamente, o Monte de São Félix, Serras de Rates, de Pias, de Santa Justa, de Castiçal, de Facho e de Santo Antoninho, Serras das Flores, de S. Domingos, Alto de S.Paúl, Alto de S.Gens, entre outros.

No que diz respeito à rede hidrográfica que banha a área em estudo destacam-se o rio Ave e afluente deste, o rio Este e o rio Douro. Além deste último rio, os maiores cursos de água que atravessam a área são os afluentes do mesmo, os rios Sousa, Ferreira e Paiva (Cartas Geológicas 1:50 000: 9A - Póvoa do Varzim, 9C – Porto, 9D - Penafiel, 13B -Castelo de Paiva, 14A – Lamego, 14C – Castro D’Aire; Couto, 1993).

## 2.2 ENQUADRAMENTO GEOTECTÓNICO

Sob o ponto de vista paleogeográfico e geotectónico a área estudada encontra-se situada na Zona Centro Ibérica (ZCI) (Figura 2), uma das grandes unidades geológicas do Maciço Ibérico, segundo a zonografia estabelecida (Lotze 1945; Julivert et al., 1974; Ribeiro, 1979).

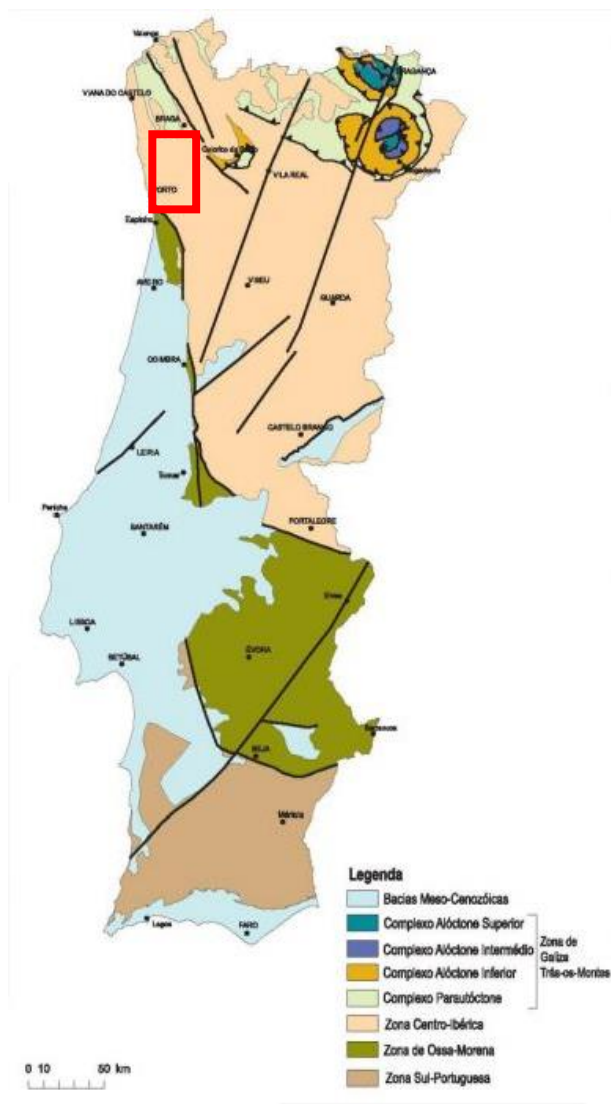


Figura 2 – Mapa das grandes zonas geotectónicas e estruturas maiores, Carta Geológica de Portugal 1:1000000 (Duarte & Santos, 2010)

## 2.3 CARTOGRAFIA GEOLÓGICA

O conhecimento geológico encontra-se sintetizado em cartas geológicas a várias escalas: a cartografia geológica na escala 1:500 000 divide Portugal continental em duas folhas, a folha Norte e a folha Sul (Figura 3), a cartografia à escala 1:200 000 que divide o país em oito folhas (1,2,3,4,5,6,7,8) e por último a cartografia à escala 1:50 000, que é constituída por 177 folhas (Figura 3). A área em estudo, distrito Dúrico - Beirão, encontra-se representada na folha Norte na escala 1:500 000 publicada em 1992 pelos Serviços Geológicos de Portugal, na folha 1 e nas folhas 9A (Póvoa de Varzim); 9D (Penafiel); 13B (Castelo de Paiva), porém parte da área também se apresenta nas folhas 9C (Porto), 14A (Lamego) e 14C (Castro Daire) da carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000 (Figura 3). As Cartas Geológicas 1:50 000 e 1:200 000 serviram de base para a descrição da geologia presente na área em estudo.

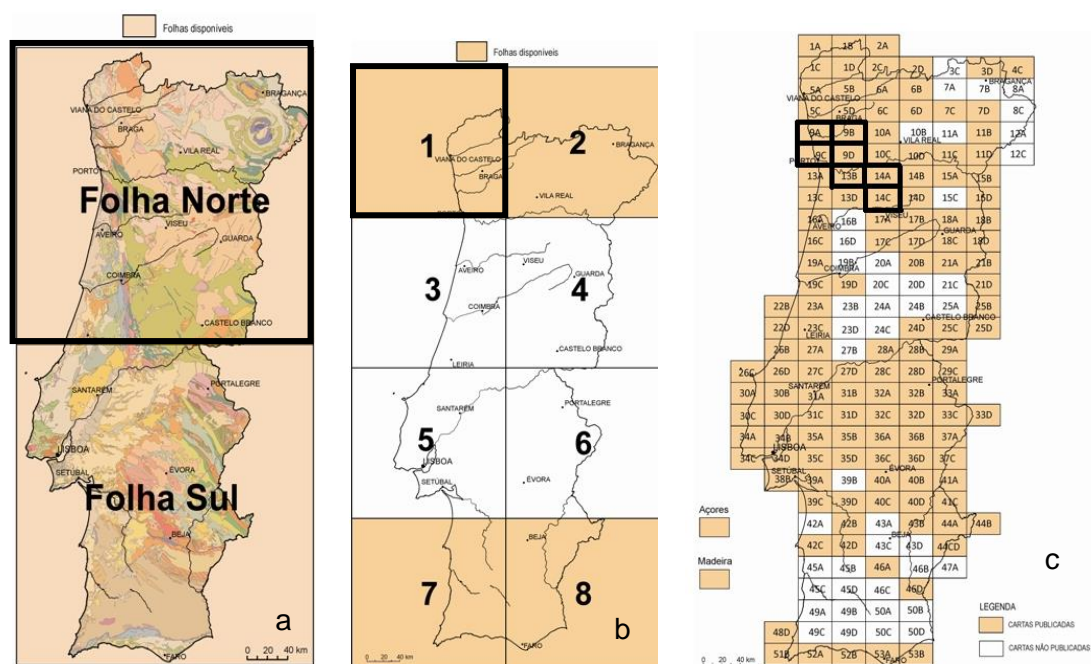


Figura 3 - Localização da área em estudo nos mapas cartográficos existentes. a) Divisão cartográfica de Portugal, na escala 1/500 000 (<http://www.lneg.pt/servicos/139/>); b) Divisão cartográfica de Portugal na escala 1/50 000 (<http://www.lneg.pt/servicos/127/>)

## 2.4 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A área de estudo encontra-se, sobretudo, abrangida pelas folhas 9A (Póvoa de Varzim); 9D (Penafiel); 13B (Castelo de Paiva), porém parte da área também se apresenta nas folhas 9C (Porto), 14A (Lamego) e 14C (Castro Daire) da carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000.

O enquadramento geológico teve como base descritiva, a notícia explicativa da folha geológica 1, a notícia explicativa das folhas 9-A (Póvoa de Varzim), 9-D (Penafiel), 13-B (Castelo de Paiva) à escala 1:50 000 e Couto (1993).

Esta corresponde ao distrito auri-antimonífero Dúrico-Beirão, com uma extensão de cerca de 90 km, desde a Lagoa Negra (que se encontra no NW de Portugal situada no distrito de Braga, do concelho de Barcelos da freguesia de Barqueiros) até Gafanhão (situado no distrito de Viseu, do concelho de Castro Daire).

Geologicamente, este local insere-se numa estrutura geológica, o Anticlinal de Valongo, que se trata de uma antiforma anticlinal assimétrica (Figura 4), com direção NW-SE, cujo eixo mergulha 5 a 15° para NW, com um plano axial inclinado 60° para NE, estende-se por mais de 90 km em Portugal, entre Esposende e Castro Daire. O flanco normal apresenta uma extensão de 20 km e uma inclinação de 35° para NE, por outro lado, o flanco inverso é muito mais inclinado e prolonga-se 50 km para sul e é aproximadamente sub-vertical (Couto, 1993).

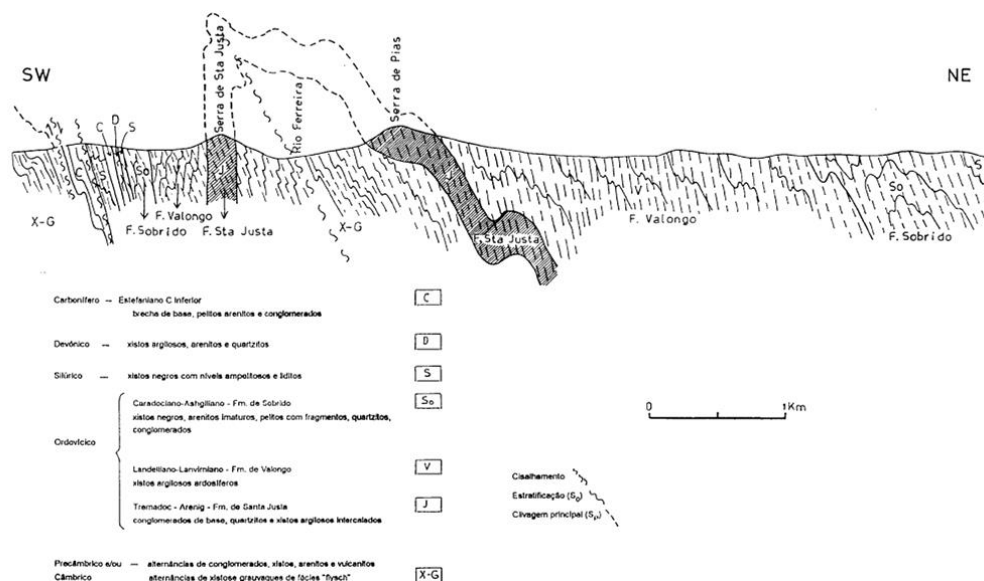


Figura 4 - Perfil Geológico na folha 9-D (Penafiel) da Carta Geológica dos Serviços Geológicos de Portugal na escala de 1/50 000, onde se pode visualizar o Anticlinal de Valongo (Couto, 1993)



Constata-se, na região, uma inversão do relevo, pois o Anticlinal corresponde ao vale do Rio Ferreira, ocupando terrenos mais antigos, que a erosão pôs a descoberto (Carta 9D – Penafiel).

Na área estão presentes Depósitos Modernos (Aluviões atuais, areias e cascalheira de praia ou de rio e areias de duna) e Depósitos do Quaternário (depósitos de praias antigas e terraços fluviais) (Couto, 1993).

Através da coluna estratigráfica geral (espessuras baseadas na folha 9-D (Penafiel) da Carta Geológica dos Serviços Geológicos de Portugal na escala de 1:50 000) e segundo Couto (1993), as rochas (terrenos Paleozóicos ocupam uma vasta área de direção NW-SE) que constituem o Anticlinal têm idades compreendidas entre o Pré-câmbrico e/ou Câmbrio até ao Devónico.

Contudo, o Anticlinal é delimitado a SW e NE por um conjunto de granitos variscos, abrangendo diversos tipos litológicos (Ferreira *et al.*, 1987 in Couto, 1993) (Figura 5).

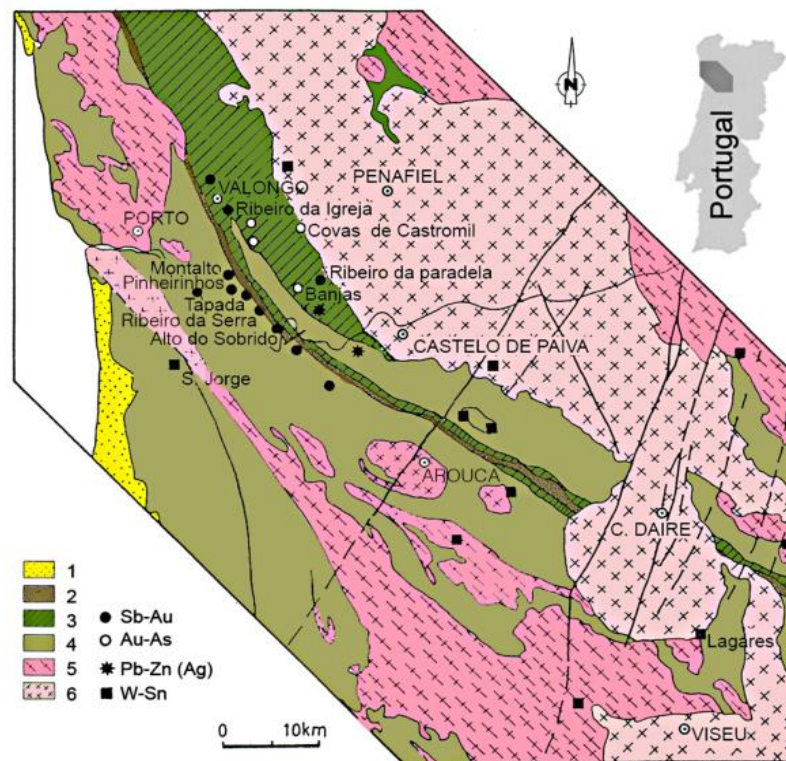


Figura 5 – Geologia área de estudo, 1 - Quaternário; 2 - Carbonífero; 3 - Ordovício a Devónico; 4 - Precâmbrico e/ou Câmbrio?; 5 – Granito de duas micas 6 – Granito biotítico.(Couto *et al.*, 2007)

## 2.4.1 ESTRATIGRAFIA/PALEOZÓICO

O Paleozóico da região Dúrico-Beirã ocupa uma vasta área de direção NW-SE e é representada por formações de idade compreendida entre o Precâmbrico e/ou Câmbrico ao Carbonífero.

### 2.4.1.1 PRÉCÂMBRICO E/OU CÂMBRICO

O Précâmbrico e/ou Câmbrico? (Complexo Xisto – Grauváquico) ocorre no núcleo do Anticlinal de Valongo e a SW do flanco inverso, é composto, essencialmente, por xistos e frequentemente por grauvaques, metamorforizados nas orlas de contato com o granito originando xistos luzentes e mosqueados; intercaladas na série dos xistos e grauvaques verificam-se algumas bancadas de conglomerados, muito compactas e com os elementos deformados.

O CXG desta área pertence ao Grupo do Douro. Sousa (1985 *in* Couto, 1993) considera que o Grupo das Beiras, do Precâmbrico Superior tende a ser mais antigo que o Grupo do Douro que apresenta a idade de Câmbrico Inferior a Médio ou Superior.

A unidade de Terramonte, a unidade de Montalto e a unidade de Alto do Sobrido são as três unidades descritas no CXG.

A unidade de Terramonte está localizada no núcleo do Anticlinal, sendo que o Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) é constituído por sedimentos de origem turbidítica, tipo "flysch" (Thadeu, 1977; Medeiros *et al.*, 1980 *in* Couto, 1993). Nesta encontram-se xistos siliciosos negros com alternâncias de níveis gresosos (associação litológica inferior), alternâncias de pelitos e vaques quártzicos (associação litológica superior). Pontualmente, observam-se nódulos de pequenas dimensões, oxidados, que poderão ter origem orgânica.

Na unidade de Montalto ocorrem três associações litológicas (associação litológica inferior, intermédia e superior). A primeira é constituída por xistos cinzentos a violáceos, grauvaques finos e rochas vulcânicas, a segunda por xistos de cor bege acinzentada com intercalações de arenitos e níveis de xistos acetinados e a terceira por conglomerados com níveis de pelitos e arenitos .

A unidade do Alto do Sobrido, localizada a SW do flanco inverso do Anticlinal de Valongo compreende alternâncias de xistos e arenitos, cuja idade estratigráfica se inclui no Complexo Xisto-grauváquico.

Nestas duas últimas unidades, o Complexo Xisto-Grauváquico exhibe características mais superficiais.

#### 2.4.1.2 ORDOVÍCIO

No Ordovício, as formações assentam em discordância angular sobre o Complexo Xisto-Grauváquico, provocada por uma fase de deformação sarda, de natureza epirogénica (Ribeiro 1979b *in* Couto, 1993), sendo que existem três formações litoestratigráficas sucessivas distintas, a Formação de Santa Justa, a Formação de Valongo e a Formação de Sobrido.

A Formação de Santa Justa contém litologias predominantemente quartzíticas, os quartzitos maciços, comumente assinalados como "Quartzitos Armoricanos", formam duas longas cristas que correspondem aos dois flancos do Anticlinal de Valongo e apresentam estruturas orgânicas, detalhadamente, *Cruziana*, *Vexillum*, *Skolithos* e *Planolites*. Sobrepostas por uma sequência fina bandada de alternâncias de sedimentos gresosos claros e sedimentos pelíticos escuros onde existem níveis vulcanossedimentares. Na base da sequência é possível identificar um conglomerado de base constituído principalmente por elementos quartzosos, que marca o início de uma transgressão. Pontualmente, verifica-se a ocorrência de níveis negros com matéria orgânica com fósseis de algas e briozoários.

A Formação de Valongo é constituída por siltitos rosados que sucessivamente vão passando para siltitos de cor cinza, em sobreposição ocorrem estratos siltitos de cor cinza e xistos do Lanvirniano médio a Landeiliano, materializando a sequência desta formação, que apresenta 300 m de espessura. Também nestas rochas são observados fósseis, nomeadamente, trilobites, graptólitos, braquiópodes, cistoides, crinóides, gastrópodes, cefalópodes e bivalves.

A Formação do Sobrido possui dois membros, um inferior de quartzitos e um superior que se sobrepõe ao anterior e é constituído na sua maioria por grauvaques ou grés argilosos, apresentando ainda uma sequência diamictítica constituída pelos designados "pelitos com fragmentos" que ocorrem no topo. Na passagem da formação anterior para os quartzitos que iniciam esta formação, existe um horizonte ferruginoso (Couto, 1993).

### 2.4.1.3 SILÚRICO

Ao longo do Anticlinal, o Silúrico ocorre em duas faixas extensas, a ocidental, mais estreita que a oriental, todavia na folha 9A, o Silúrico abrange somente uma larga faixa, com orientação NW-SE. Na área compreendida pelo distrito mineiro, este ocorre numa estreita faixa, localizada no flanco oeste.

O contacto entre o Silúrico e Ordovícico, materializado por uma descontinuidade, quase impercetível no campo, podendo ocorrer ocasionalmente níveis ferrugionosos associados a esta (Gutiérrez-Marco *et al.*, 1990 *in* Couto, 1993)

As rochas fossilíferas existentes constituem xistos negros, grafitosos ou xistos brancos, liditos e ftanitos. Nestes afloramentos localizam-se algumas jazidas mais ricas de graptólitos do Silúrico, indicando uma idade que vai do Landoveriano médio-superior ao Ludloviano?.

Em geral nesta região, o Silúrico é composto por xistos carbonosos e liditos, constituindo a Formação de Xistos Carbonosos e alguns quartzitos integrando os Quartzitos do Bougado (Oliveira *et al.*, 1992 *in* Couto, 1993)

### 2.4.1.4 DEVÓNICO

O Devónico ocorre entre o afloramento Silúrico ocidental e o Carbonífero constituindo uma estreita faixa de largura variável, no flanco oeste do Anticlinal, com algumas interrupções.

A transição das formações do Silúrico para este período, ocorre de modo gradual, o Devónico integra formações gresoso-pelíticas, fossilíferas, que constituem a última deposição de terrenos de fáceis marinhas (Medeiros *et al.*, 1980 *in* Couto, 1993).

O Devónico inferior começa com três importantes níveis quartzítico-conglomeráticos, seguindo pelitos, siltitos e grauvaques referíveis a sedimentação turbidítica, integrando a Formação do Sobrado. Estas rochas apresentam fósseis de trilobites, braquiópodes, crinóides, bivalves, gastéropodes, polípeiros? briozoários? (Notícias Explicativas das folhas 9A - Póvoa do Varzim, 9D – Penafiel e 13B – Castelo de Paiva).

Particularmente em Midões, o Devónico integra xistos argilosos finos muito macios, de cor amarela ou amarelo-arroxeadada e por vezes a cinzenta azulada que apresentam fósseis, nomeadamente, trilobites, braquiópodes, crinóides, (Medeiros, 1964 *in* Couto, 1993).

#### 2.4.1.5 CARBONÍFERO

As fáceis continentais do Carbonífero depositaram-se ao longo do flanco oeste do Anticlinal de Valongo, em bacias limnáticas, fazendo parte da designada Bacia do Douro (Sousa & Wagner 1983 *in* Couto, 1993)

A oeste, o Carbonífero contacta com o Précâmbrico ou câmbrico, em quase toda a sua extensão, materializando um cavalgamento, na parte terminal entre Souto e Cavadas repousa sobre o granito.

Do lado sudoeste, o Carbonífero assenta em discordância sobre os terrenos do Complexo Xisto–Grauváquico, de nordeste, contacta com os xistos do Devónico inferior ou com xistos com *Monograptus* do Silúrico.

Do ponto de vista litológico, o Carbonífero é constituído, de ocidente para oriente na base, por formação brechóide, espessa, constituída por elementos provenientes das rochas vizinhas mais antigas sobretudo do complexo Xisto-Grauváquico. Esta brecha, cuja origem pode relacionar-se com depósitos de vertente de bacia primitiva, é conhecida em quase toda a extensão do afloramento Carbonífero. Trata-se de uma formação claramente sedimentar e não de brecha de falhas.

Existem rochas fossilíferas em diversos pontos, especialmente nos xistos.

A formação contém alguns leitos de antracite que motivaram a instalação das minas de S. Pedro de Cova e Midões atualmente esgotadas e encerradas.

Ocorre ainda outra bacia carbonífera mais pequena e um pouco mais antiga, designada por Bacia de Ervedosa (Couto, 1993, Notícias Explicativas das folhas 9A - Póvoa do Varzim, 9D – Penafiel e 13B – Castelo de Paiva).

## 2.4.2 METAMORFISMO

Na área de estudo podem ser definidos dois principais domínios de metamorfismo, o Anticlinal de Valongo e o cisalhamento do sulco carbonífero Dúrico – Beirão.

O Anticlinal de Valongo e a sua continuação para N situa-se em plena zona de influência do cisalhamento do sulco carbonífero Dúrico – Beirão, representando, baixos graus de metamorfismo, sendo que somente se observa estruturas de 1ª fase, pouco ou nada afetadas pela 3ª fase de deformação.

O domínio de antiformal de Valongo prolonga-se de Fão para SSE até a Aguiar de Sousa, limitado por granitos a E, transpondo ligeiramente o cisalhamento do sulco carbonífero Dúrico-Beirão a W (Notícia Explicativa Folha 1, 1:200 000).

A recristalização metamórfica é diminuta ou, praticamente, inexistente estando relacionada com 1ª fase de deformação, sendo que as figuras sedimentares se encontram preservadas, existem bastantes fósseis e as litologias predominantes detêm granularidades pelíticas e siltíticas.

As regiões com maior grau de metamorfismo, como S. Pedro da Cova apresentam constituintes mineralógicos estirados e achatados e as regiões menos metamórficas apresentam granularidade irresolúvel ao microscópico, recristalização incipiente e clivagem fruste ou ausente.

A terceira fase de deformação manifesta-se somente em pequenas dobras de crenulação sem clivagem associada, e é mais marcada no limite oriental, onde afloram granitos.

No cisalhamento do sulco carbonífero Dúrico – Beirão afloram terrenos de idades compreendidas entre o Câmbrio e o Silúrio, fortemente instruídos por granitos.

A recristalização metamórfica é elevada, estando associada à 3ª fase da deformação, sendo que as litologias mais frequentes são xisto pelíticos, quartzo feldspáticos (Notícia Explicativa Folha 1, 1:200 000).

### **2.4.3 GRANITÓIDES**

As rochas graníticas têm larga representação no distrito mineiro auro – antimonífero Dúrico - Beirão, sendo que estes delimitam a SW e NE o Anticlinal, contundo não se encontram, estritamente, relacionados com os filões mineralizados.

Maioritariamente, os depósitos de Sb – Au apresentam-se a 8-10 km do granito, todavia os depósitos de W-Sn encontram-se bem mais perto de granitos aflorantes.

Os principais granitóides encontrados são granitos de duas micas, sin-tardi D3 e granitos biotíticos sinorogénicos tardi – pós D3 (Couto & Borges, 2007)

### **2.4.4 FILÕES E MASSAS**

Os filões encontram-se nos flancos do Anticlinal. Na fase final da instalação dos maciços graníticos, formaram-se fraturas de duas direções dominantes, onde se encaixaram filões e massas. Uma das direções é coincidente com o grande eixo dos maciços graníticos, NW-SE, e a outra direção é NE-SW.

Os filões instalados na área de estudo compreendem filões de quartzo, filões aplito – pegmatíticos, filões de pórfiros graníticos e filões doleríticos.

Os filões de quartzo na área de estudo são numerosos, embora de pequenas dimensões, por outro lado, os filões doleríticos apresentam uma orientação N-S e NW-SE, ocorrem quase sempre alterados e apresentam disjunção esferoidal.

Os filões aplito – pegmatíticos não são muito abundantes, contudo na área da folha de Penafiel, desenvolvem-se por toda a área, preenchendo fraturas de direção NE-SW ou NW-SE. Adicionalmente, também é possível observar na área, filões de pórfiros graníticos (Notícia Explicativa das folhas 9A-Póvoa do Varzim, 9D – Penafiel e 13B – Castelo de Paiva).

### **2.4.5 RECURSOS MINERAIS**

Na região de estudo são numerosas as explorações mineiras e pedreiras, salientando as mais importantes como as de carvão, antimónio e ouro, volfrâmio, ferro, granito e as louseiras.

O carvão foi explorado na faixa carbonífera Dúrico-Beirã, nomeadamente, no couto mineiro do Pejão, situado no concelho de Castelo de Paiva e couto mineiro de São Pedro da Cova, no concelho de Gondomar. Este apresentava elevada percentagem de cinzas, sendo antracitoso. Adicionalmente, outras minas conhecidas são as minas de Gens e Midões.

O antimónio e ouro eram explorados em filões auro - antimoníferos de direção e inclinação bastante distintas, encaixados nos terrenos do CXG e do Ordovícico. As principais explorações de antimónio e ouro conhecidas localizam-se na da Mina da Lagoa Negra, Montalto, Santa Justa, Couce, Carvoeiro, Pias, Medas, Tapada, Pinheirinhos, Fontainhas, entre outras. Em toda a região de Valongo existe testemunhos de explorações romanas.

O ferro foi explorado na vertente leste da Serra de Rates onde existiam pequenas concentrações de limonite, atualmente, este jazigo não tem qualquer valor económico.

Na área de estudo existem diversas pedreiras de granito para construção, sobretudo, granito porfiróide de grão médio.

A exploração de louseiras ocorreu, essencialmente, em Valongo e as formações exploradas pertencem ao Landeiliano (Notícia Explicativa das folhas 9A-Póvoa do Varzim, 9D – Penafiel e 13B – Castelo de Paiva).

#### **2.4.6 DEPÓSITOS MODERNOS**

Destacam-se extensas acumulações de depósitos recentes ao longo dos rios e ribeiros, ocasionalmente, desenvolvidos. Os principais materiais constituintes são areias e lodos fluviais, depósitos argilosos de fundo de vale (depósitos finos, argilosos, no geral aproveitados como terrenos de cultura).

Na orla litoral existem depósitos de praias antigas, constituído por areias e cascalheira de calhaus rolados

Ao longo da margem dos rios Douro, Sousa, Paiva, Leça, Ferreira, Ave e Este encontram-se depósitos de terraços fluviais (Notícia Explicativa 9A-Póvoa do Varzim, 9D – Penafiel e 13B – Castelo de Paiva).



# CAPÍTULO 3

## MINERALIZAÇÕES DE ANTIMÓNIO

### 3.1 MINERALOGIA E GÉNESE

### 3.2 OCORRÊNCIA NO NORTE DE PORTUGAL

### 3.3 TEORES, PRODUÇÕES E RESERVAS DE ANTIMÓNIO

### 3.4 APLICAÇÕES DO ANTIMÓNIO

### 3. MINERALIZAÇÕES DE ANTIMÓNIO

#### 3.1 MINERALOGIA E GÉNESE

O Antimónio (Sb) é o elemento químico de número atómico 51, localizado no 5º período e grupo 11. Embora seja geralmente descrito como um metal, possui características metálicas e não-metálicas, é mais apropriadamente descrito como um semimetal ou metaloide. Comparativamente com outros metais, o antimónio é um mau condutor de eletricidade e calor (Butterman, 2004).

Na tabela 1 estão apresentadas as principais características físico-químicas deste elemento.

Tabela 1 - Propriedades físico – químicas do Antimónio.

	Antimónio
Número Atómico	51
Massa Atómica (g)	121,760
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	6,691
Principal estado de Oxidação	+3 (-3, +4, +5)
Dureza	153
Estado (a 300 K, 1atm)	Sólido
Grupo	Não – metal pesado (metaloide)
Ponto de fusão (°C)	630
Estado magnético	Diamagnético

Na atualidade, identificam-se 249 minerais com antimónio, sendo que os minerais mais importantes deste elemento são os subsequentes: estibina ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ), quermesite ( $2\text{Sb}_2\text{S}_3 \cdot \text{Sb}_2\text{O}_3$ ), senarmonite ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , do sistema cúbico), valentinite ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , ortorrômbico), bindheimite ( $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), stibiconite ( $\text{H}_2\text{OSb}_2\text{O}_5$ ), tetraedrite ( $\text{Cu}_8\text{Sb}_2\text{O}_7$ ), e jamesonite ( $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_5$ ) (Bettencourt *et al.*, 2005; Moura & Velho, 2012).

Contudo, apenas o sulfureto estibina (também conhecido com antimonite) é valorizado do ponto de vista económico. É um mineral de forte brilho metálico, dureza entre 3 a 3,5; hábito prismático alongado, ocorrendo por vezes em drusas. Este sulfureto compreende 71,88 % Sb em peso (Jesus, 1928; Moura & Velho, 2012).

Segundo Ferreira *et al.*, 1971; Andrade & Ferreira, 1976; Couto *et al.*, 1990; Noronha *et al.*, 1998 in Neiva *et al.*, 2008 as principais associações naturais para o antimónio são:

- a) Quartzo+estibina em filões de Sb-quartzo.
- b) Quartzo+pirite+galena+berthierite em filões de Pb-Sb-quartzo;
- c) Três associações diferentes para filões de Sb-Au-quartzo.
  - i. Quartzo+esfalerite+estibina
  - ii. Quartzo+pirite+berthierite+estibina
  - iii. Quartzo+arsenopirite+pirite+estibina

Comummente, os jazigos de antimónio são do tipo filoniano, contudo, podem também constituir massas irregulares. A formação destes jazigos, normalmente, ocorre a partir de soluções hidrotermais de baixa temperatura, que precipitam a pequena profundidade. Geralmente, diferenciam-se dois tipos de jazigos, um de mineralogia simples e outro de mineralogia mais complexa. O jazigo de mineralogia simples é caracterizado pela predominância da estibina sobre os outros minerais (ouro, pirite e outros sulfuretos) numa ganga quartzosa. No segundo caso, o antimónio é subproduto de refinação e os jazigos comportam quantidades significativas de pirite, arsenopirite, por vezes cinábrio, scheelite e sulfuretos de Cu, Pb, Ag e Zn (Butterman, 2004; Moura & Velho, 2012).

Na natureza, os estados de oxidação de antimónio são Sb (III) e Sb (V), contudo o primeiro apresenta um campo de estabilidade superior ao segundo (Moura & Velho, 2012).

### **3.2 Ocorrências no Norte de Portugal**

Segundo Gumiel & Arribas (1987) a maioria dos depósitos de antimónio ocorrem na ZCI.

As principais rochas hospedeiras dos mesmos são metassedimentos do Câmbrio e rochas aflorantes nos núcleos de anticlinais Variscos (Gumiel, 1983; Ortega *et al.*, 1996).

No norte de Portugal, as mineralizações de Sb podem ocorrer no distrito de Bragança (Sb-quartzo e Pb-Sb-quartzo) (Figura 6) e na Região Dúrico-Beirã (Sb-Au-Quartzo) (Figura 7).

No distrito de Bragança existem vários filões de Sb-quartzo e alguns filões de Pb-Sb-quartzo com estruturas lenticulares, até 1,3 m de espessura, contendo sulfuretos e sulfossais.

Os minérios de antimónio encontram-se unicamente quando a precipitação hidrotérmica ocorre em filitos do Silúrico. Os filões apresentam uma estrutura brechificada com fragmentos de quartzo e filito, localmente metagrauvaque e quartzo, cimentados por agregados de quartzo que também contém moscovite secundária e localmente barite, ankerite e calcite.

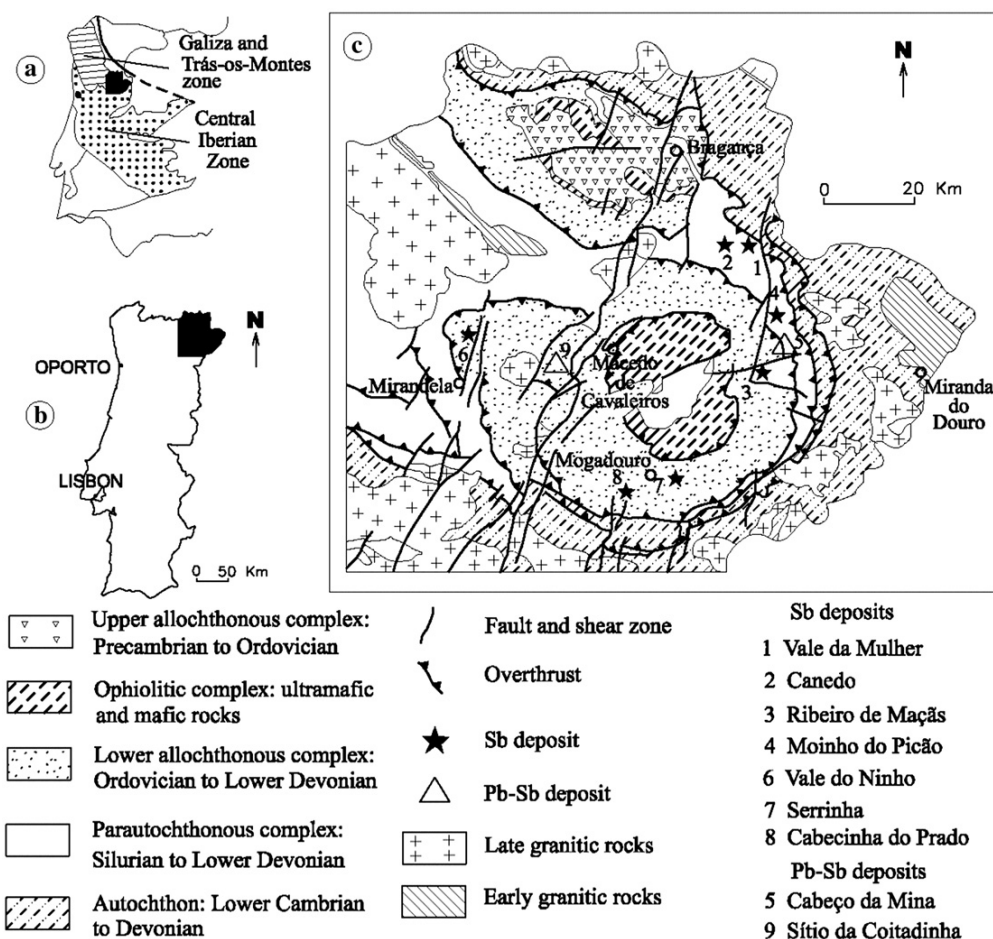


Figura 6 – Mapa Geológico simplificado do NE de Portugal, localização do Distrito de Bragança e dos depósitos de antimónio desse (adaptado de Serviços Geológicos de Portugal, 1992 in Neiva *et al.*, 2008).

Maioritariamente, a sua exploração deu-se no final do século 19, porém, em Canedo, Serrinha e Sítio da Coitadinha, a exploração teve lugar entre 1943 e 1945. Já em Cabeço da Mina, os minérios foram explorados de 1952 a 1955. No distrito de Bragança, oito minas produziram cerca de 33 t de antimónio.

Na região Dúrico - Beirã, os filões de Sb-Au-quartzo apresentam-se brechificados e as suas espessuras podem variar de alguns centímetros a 3,6 m, com as seguintes orientações NE-SW, NNW-SSE e ENE-WSW. Estes veios são hospedados por filitos do Câmbrico, metagravaques com intercalações de metaconglomerados e metarenitos e afloram nos flancos do Anticlinal (Couto, 1993; Gumiel & Arribas, 1987)

Os filões mineralizados em antimónio e ouro encontram-se distantes de intrusões graníticas.

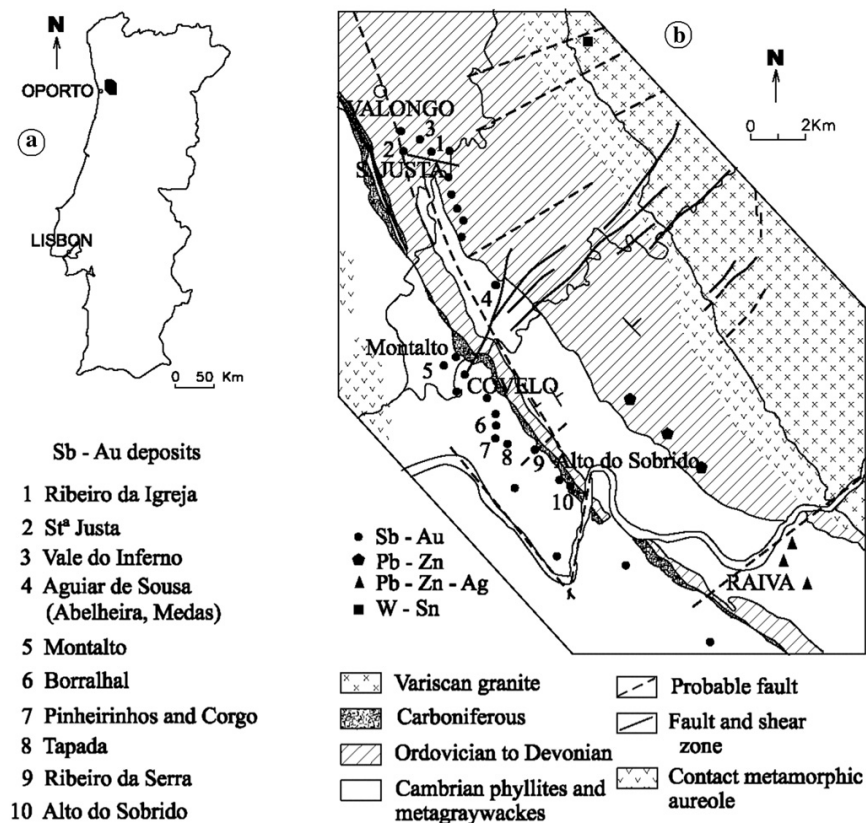


Figura 7 – Mapa Geológico da Região Dúrico – Beirã e localização dos depósitos de Sb – Au, adaptado de Couto, 1990 in Neiva *et al.*, 2008

Nesta região, no final do século 19, foram registadas 63 áreas de antimónio, todavia, algumas destas também abarcam ouro. Na totalidade, as doze principais minas produziram, aproximadamente, 12000 t de minério de antimónio, contendo 2t de ouro (Couto *et al.*, 1990).

Os jazigos de Vale de Achas e Ribeiro da Igreja foram os primeiros a serem descobertos em 1807, contudo apenas em 1858 foi iniciada a exploração.

Nas minas de Vale de Achas e Ribeiro da Igreja (Figura 8, quadro paragenético muito completo) foram efetuados alguns trabalhos de exploração que finalizaram em 1833, abrindo novamente em 1839 e suspendendo, em 1842. Os trabalhos nestas minas recomeçaram em 1850 e voltaram a encerrar em 1853.

A abertura das minas da Tapada e Ribeiro da serra deu-se em 1880 enquanto a mina de Montalto (uma das mais produtivas da região) iniciou a sua atividade em 1881. As minas referidas produziram anualmente milhares de toneladas de concentrados de antimonite para exportação.

Outros trabalhos também inseridos no denominado distrito auri-antimonífero Dúrico-Beirão são as minas de Lagoa Negra, Alto de Sobrido, Pinheirinhos, Banjas (o antimónio não foi assinalado de forma significativa), Tapada e Fontinha (Couto, 1993; Instituto Geológico e Mineiro, 2000)

Nas décadas 1870 – 1890 deu-se o auge da exploração. Todavia, ainda existiram minas de pequena envergadura em Ribeira das Maças e Moinho de Picão (Vimioso), Sítio da Coitadinha (Macedo de Cavaleiros), Canedo (Bragança), Vale do Ninho (Mirandela), Barroca da Santa (Castelo Branco) e Herdade da Prata (Montemor-o-Novo). A última produção de antimónio ocorreu em 1973.

Macroscopicamente, os minerais metálicos em maior quantidade, nos depósitos, são a estibina, pirite, calcopirite, limonite, arsenopirite e, mais raramente, ouro. Estes depósitos são todos do tipo filão de quartzo, a possança média dos filões é de cerca de 0,80 m, mas por vezes atingem os 2,5 m.(Moura & Velho, 2012).

Para além das mineralizações de Sb-Au, também existem Pb-Zn-(Ag) e Sn-W, Pb-Zn-Ag, Sn-W no distrito referido anteriormente.

Segundo Couto (1993), o estudo paragenético indicou a ocorrência de cinco estádios de mineralização, um primeiro estádio ferri-arsenífero, predominante, posteriormente um estádio zincífero, e um terceiro, plumbi-antimonífero, que precedeu o depósito maciço de antimónio (quarto estádio), essencialmente sob a forma de berthierite e estibina e um quinto estádio polimetálico, rico de Pb-Zn-Cu (Figura 8).

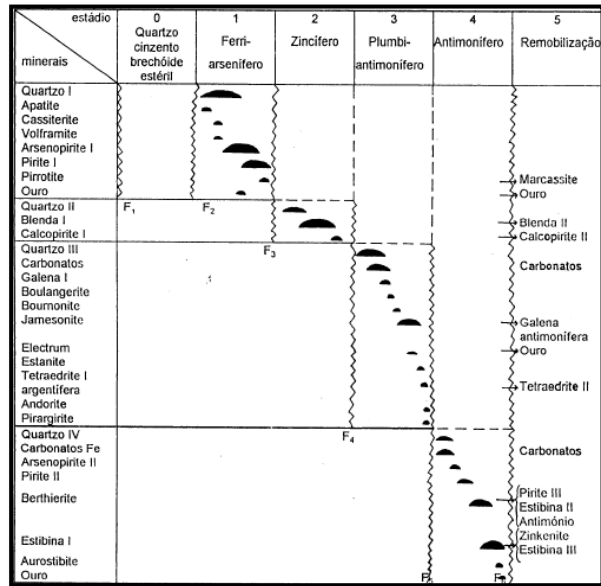


Figura 8 – Sucessão paragenética e evolução geoquímica das mineralizações de Ribeira da Igreja (Sb - Au) (Couto, 1993)

Considera-se que as minas da região de Valongo – Gondomar, possam ainda conter reservas de 500 000 t de minério antimonífero (Dias de Carvalho, 1969 *in* Moura & Velho, 2012).

### 3.3 TEORES, PRODUÇÕES E RESERVA DE ANTIMÓNIO

O antimónio é considerado um elemento raro na natureza, apresentando um teor médio na crosta continental (*clark*) de 0,2 ppm, existindo uma pequena variação entre os distintos tipos de rochas.

Desta forma, um jazigo com teor médio de 4% de Sb subentende um enriquecimento de 200 000 vezes, um valor alto, comparativamente a certos jazigos de cobre para os quais basta um enriquecimento de 100 vezes.

Na tabela 2 apresentam-se os teores médios deste elemento na crosta continental e nos diversos tipos de rochas e solos.

Tabela 2 - Teores médios de antimónio (ppm) na crosta continental, em vários tipos de rocha, água do mar e solos (Bettencourt *et al.*, 2005; Buttermann, 2004)

<b>Crusta continental</b>	0,2
<b>Granitos, Granodioritos</b>	0,2
<b>Arenitos, Quartzitos</b>	0,05
<b>Argilitos, Xistos</b>	1,0
<b>Água do Mar</b>	0,0002
<b>Solos</b>	0,5

Nos materiais superficiais, o teor de antimónio é utilizado como elemento guia na prospeção de ocorrências com antimónio, ocorrências de ouro, de prata e de polimetálicos (Bettencourt *et al.*, 2005).

O antimónio é extraído em 15 países e a sua produção mundial no ano de 2009 foi de 150000 t. A China (140000t), a África do Sul (3500t) e a Bolívia (3000t) são os três principais produtores. Nesse ano, as reservas mundiais eram de 1800 000 t (Moura & Velho, 2012).



### 3.4 APLICAÇÕES DO ANTIMÓNIO

Desde da Antiguidade que o antimónio é conhecido, todavia era usado como cosmético e fármaco.

Atualmente, o antimónio apresenta várias aplicações, a mais importante é em têxteis, principalmente em roupa para crianças, como retardante de chama. Os óxidos de antimónio em contacto com fogo reagem quimicamente com os materiais a arder, gerando uma camada viscosa que impede a propagação das chamas.

Na metalurgia, o antimónio é utilizado como aditivo de ligas para conferir dureza e rigidez, melhorando a resistência à corrosão. As ligas de Sb-Pb são usadas em baterias e revestimento de cabos, porém estas com o declínio do chumbo encontram-se cada vez mais em desuso.

As ligas de antimónio são usadas na eletrónica, por exemplo em detetores de infravermelhos e diodos. O antimónio ultrapuro, ou seja, de pureza superior a 99,99% é usado em tecnologia de semicondutores, ligas de AlSb, InSb e GaSb e é um composto importante em ligas do tipo  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , usadas como refrigeradores termoelétricos ou geradores.

Outras aplicações do antimónio abrangem fontes de neutrões de inicialização em reatores nucleares, fósforos de segurança, pastilhas de travão, munições, fogo de artifício, bactericidas (Bettencourt *et al.*, 2005; Moura & Velho, 2012).



# CAPÍTULO 4

## MAGMATISMO BÁSICO FILONIANO: DOLERITOS E DIABASES

### 4.1 MINERALOGIA E GÉNESE

### 4.2 DOLERITO OU DIABASE

### 4.3 FILÕES BÁSICOS NO DISTRITO DÚRICO BEIRÃO

### 4.4 TRABALHO DE CAMPO

## 4 MAGMATISMO BÁSICO FILONIANO: DOLERITOS E DIABASES

### 4.1 MINERALOGIA E GÉNESE

O dolerito é uma rocha ígnea de cor escura devido à quantidade de minerais ferromagnesianos predominantes, é equivalente, composicionalmente, ao gabro e basalto, mas de granulometria média. Na prática, rochas de granulometria média são compostas por minerais visíveis à vista desarmada, todavia, a sua identificação é um pouco difícil. Esta é considerada uma rocha básica constituída por plagioclases, principalmente labradorite e piroxenas (augite). Contudo, o dolerito também pode conter olivina, quartzo e uma grande variedade de minerais acessórios como a hornblenda, biotite, magnetite, ilmenite e clorite.

Estas rochas básicas podem ser classificadas como rochas hipabissais, denominadas também de rochas subvulcânicas, que se formam através de uma cristalização a velocidade média e taxa de arrefecimento moderado.

Constituem corpos subvulcânicos que ocorrem na forma de pequenas intrusões, pequenos lacólitos, soleiras (corpos de rocha ígnea tabulares que se formam paralelamente a camadas pré-existentes) e diques (corpos de rochas ígneas tabulares que atravessam camadas pré-existentes de rochas ou organismos) (Figura 9) (Sloane, 1991; Hermes, 1964; Documentos unidade curricular Petrologia I: Descrição Petrográfica da rochas ígneas do Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea da Universidade do Estado do Rio de Janeiro).

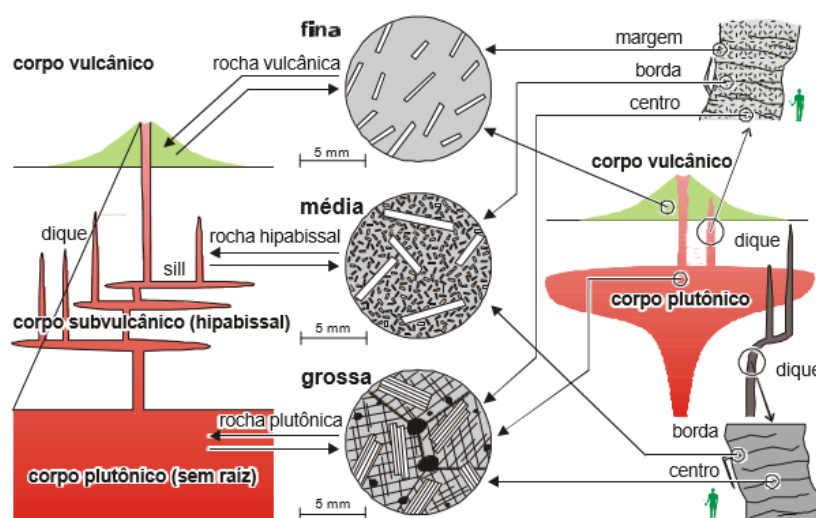


Figura 9 – Relação entre granulometria das rochas ígneas e o seu contexto geológico, à direita encontra-se o conceito tradicional e à esquerda o conceito atualizado (Unidade curricular Petrologia I: Descrição Petrográfica da rochas ígneas do Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea da Universidade do Estado do Rio de Janeiro).

## 4.2 DOLERITO OU DIABASE

Os dois termos podem ser utilizados como sinónimos, no entanto na Europa, o termo diábase é geralmente aplicado a doleritos alterados nos quais o feldspato está albitizado ou a piroxena é substituída por hornblenda e clorite. Nos Estados Unidos da América, o termo diábase é usualmente aplicado no lugar de dolerito (*Imperial College Rock Library*; Johannsen, 1927).

Segundo Sagon *in* Couto 1993, os doleritos devem ser chamados diábases quando não apresentam minerais secundários.

## 4.3 FILÕES BÁSICOS NO DISTRITO DÚRICO BEIRÃO

O magmatismo básico filoniano no distrito Dúrico – Beirão foi assinalado por Rabie em 1963 e Couto em 1993.

Normalmente, os diques e as soleiras de diábases ocorrem no distrito Dúrico Beirão interestratificados no Complexo Xisto-Grauváquico.

Na mina de Montalto, as diábases apresentam alteração meteórica mais intensa, provavelmente com grão mais grosseiro (Sagon *in* Couto, 1993) e na unidade de Alto Sobrido, próximo do contacto com o Carbonífero, estas encontram-se bastante alteradas e estão interestratificadas com os xistos e arenitos do Complexo Xisto-Grauváquico. Por outro lado, nas minas de Pinheirinhos e Corgo (Sb-Au) situadas na antiforma do Precâmbrico ou Câmbrico? com alternâncias de xistos, quartzitos e conglomerados, identificando-se também diques de diabase. Adicionalmente, as diábases também podem ocorrer na mina da Tapada (Sb-Au).

As diabases podem ser prováveis fontes de metais presentes nas mineralizações da região Dúrico-Beirã. Outras origens possíveis são os níveis vulcano-sedimentares, a brecha de base do Carbonífero e os fluídos de origem magmática (Couto, 1993).

Rabie, 1963 *in* Couto, 1993, considera que as maiores minas (Montalto, Tapada e Ribeiro da Serra), estão espacialmente associadas a diques de rochas básicas, deformados.

Estas rochas básicas foram submetidas a uma análise de elementos maiores em Couto (1993). Estas encontravam-se muito alteradas com concentração dos elementos

mais estáveis como o alumínio, titânio e fósforo e lixiviação dos elementos alcalinos (cálcio, ferro e magnésio). Os elevados teores de titânio, consequência da presença de ilmenite primária, maioritariamente, alterada em leucoxena, característica de magmas toleíticos.

Petrograficamente, algumas diabases do distrito Dúrico-Beirão apresentam os seguintes constituintes: clorite-vermiculites interestratificadas, filitos, quartzo e opacos como ilmenite primária. (Rabie, 1963 in Couto, 1993).

A orientação preferencial destes filões, adquirida através da digitalização das Cartas 1:50 000, é de N150°/160° (Figura 10).

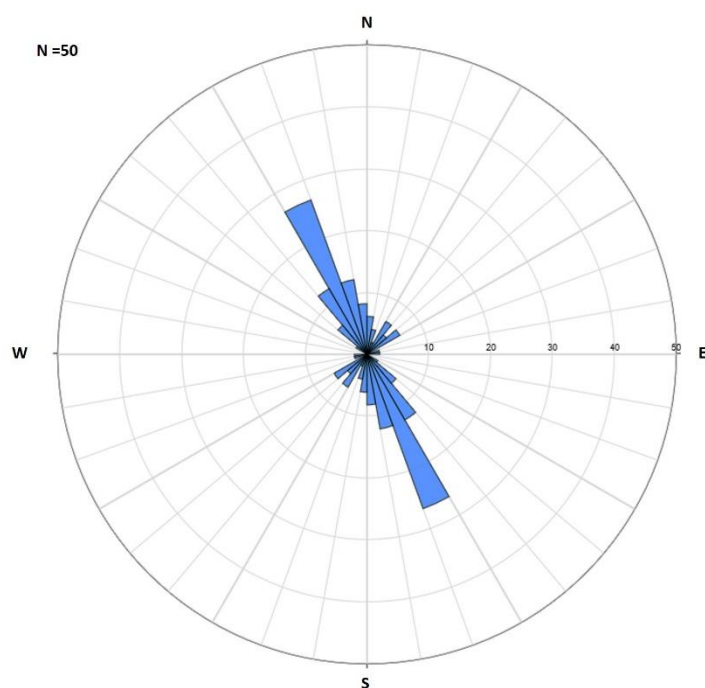


Figura 10 – Diagrama de rosetas com a orientação preferencial dos filões básicos.

**Figura 11 - Mapa de reconhecimento e localização dos filões básicos da área de estudo. Datum WGS84\_UTM29N.**



Estas medições realizaram-se somente em alguns filões, visto que, apenas 11 foram encontrados.

Os resultados destas medições encontram-se nos Capítulo 7. Em junção com estas medições foram realizadas algumas descrições no campo dos mesmos filões e do seu encaixante.

#### 4.4.1 FILÃO 1

O afloramento observado posiciona-se nas coordenadas 41,076611; -8,495157, e abrange um filão básico de orientação N-S, muito alterado e de cor alaranjada. Micaxistos com uma direção de foliação N160° constituem o seu encaixante.

#### 4.4.2 FILÃO 2

Nas coordenadas 41,073024; -8,493911, identifica-se um filão básico (Figura 12) com uma orientação, aproximadamente, N-S. Este filão apresenta-se muito alterado, de cor alaranjada e esboroável. O encaixante consiste em micaxistos com uma direção de foliação N120°, preferencialmente. Por vezes, a foliação coincide com a orientação do filão.



Figura 12 –Filão 2, marcado com linha preta a tracejado, e a rocha encaixante, os micaxistos.



#### 4.4.3 FILÃO 3

O filão básico de cor alaranjada (Figura 13) e de direção N-S encontra-se muito alterado, assim como, o seu encaixante, consistindo em xistos amarelados com foliação N40°, subhorizontal. As coordenadas deste filão são 41,101183; -8,471025.



Figura 13 - Filão 3, marcado a linha preta tracejada, encaixado em xistos muito alterados e amarelados

#### 4.4.4 FILÃO 7A E 7B

O filão 7 foi identificado em dois locais, 7A e 7B, com as coordenadas 41,107266; -8,474919 e 41,106389; -8,473988.

O filão 7A apresenta-se muito alterado, friável, de cor alaranjada, encaixando em xistos muito alterados de cor amarela.

O filão 7B, de atitude N170°; 62°E, é cortado por filonetes de quartzo e óxidos de ferro. O afloramento exhibe diferentes graus de alteração e a rocha encaixante é constituída por xistos alterados e avermelhados.

#### 4.4.5 FILÃO 9

Na localização 41,078486; -8,451046 observa-se um filão básico de coloração amarelada a avermelhada, muito alterado e por vezes esboroável, com um comprimento de 15 m e atitude N80°, subvertical (Figura 14). Este filão é cortado por filonetes de óxidos de ferro e o seu encaixante é constituído por metassedimentos com foliação N-S.



Figura 14 – Filão 9, circunscrito a linha preta tracejada, encaixado em metassedimentos.

#### 4.4.6 FILÃO 11A E 11B

O filão 11 foi encontrado em dois locais distintos, 11A e 11B, com coordenadas 41,078046; -8,438698 e 41,078046; -8,437486, respetivamente. O filão 11A encontra-se muito alterado, completamente esboroável, de atitude N140°, subvertical e está encaixado em metassedimentos com foliação de direção N120°.

O filão 11B apresenta-se menos alterado que o anterior, muito pouco friável e de cor alaranjada, contactando com quartzitos e metassedimentos com a seguinte orientação de contacto N148°;70°NE.



#### 4.4.7 FILÃO 15

Nas coordenadas 41,120737; -8,496769 posiciona-se o filão 15, alterado, de coloração alaranjada a avermelhada, de atitude N160°, subvertical. Encaixa em intercalações de xistos avermelhados e conglomerados com grãos de quartzo alongados, por vezes cortados por filões de quartzo.

#### 4.4.8 FILÃO 16

O filão básico 16 aflora em local com coordenadas 41,127511; -8,499173, e apresenta atitude N173°, subvertical. A parte superior apresenta-se muito alterada de cor avermelhada, a parte inferior mostrava o filão fresco, de cor acinzentada (Figura 15 e Figura 16).

A rocha encaixante é composta por xistos pouco alterados intercalados com quartzitos.



Figura 15 - Amostra de filão básico fresco da parte inferior do filão 16.

Os xistos apresentam foliação: N160°, subvertical, sendo que no lado direito do filão básico também se encontravam conglomerados.



Figura 16 - Filão 16, delineado a linha preta tracejada, encaixando em intercalações de xisto e quartzito.

#### 4.4.8 FILÃO 20A E 20B

Os dois filões encontrados nesta localização de coordenadas 41,135341; -8,496598 (Figura 17) encaixam em intercalações de xistos (Foliação: N161°,70°NE) e quartzitos (S0: N60°;70°SE). Os xistos são cortados por filonetes de quartzo de atitude N-S, subvertical. Verifica-se no filão básico a NE um alto grau de alteração, de coloração avermelhada e com uma orientação N100°; 53°NE.

O filão a NW é muito semelhante ao anterior, todavia apresenta uma orientação de N164°;80°NE.



Figura 17 - Filões básicos 20A e 20B, marcados com linha de cor preta a tracejado, encaixando em intercalações de xistos e quartzitos.

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISE MAGNÉTICA

### 5.1 INTRODUÇÃO

### 5.2 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

### 5.3 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

### 5.4 MAGNETISMO DAS ROCHAS E MINERAIS

### 5.5 ANOMALIAS MAGNÉTICAS

### 5.6 REDUÇÃO E CORREÇÃO DE DADOS

### 5.7 MÉTODOS MAGNÉTICOS UTILIZADOS

## 5. ANÁLISE MAGNÉTICA

### 5.1 INTRODUÇÃO

A análise magnética é o método mais antigo e mais versátil da prospeção geofísica. Não é um método muito dispendioso e é amplamente utilizado, podendo ter uma aplicação terrestre, aérea ou marinha. A sua execução é simples, as correções são mínimas, todavia, a sua interpretação é muito complexa (Telford *et al.*, 1990; Kearey *et al.*, 2002).

Este método tem como objetivo estudar a subsolo com base em anomalias magnéticas do Campo Magnético Terrestre (CMT), resultado das propriedades magnéticas das rochas subjacentes (Kearey *et al.*, 2002; Telford *et al.*, 1990)

Apesar da maioria dos minerais constituintes das rochas não serem, efetivamente, magnéticos, estas podem conter minerais magnéticos suficientes para produzir significativamente anomalias magnéticas.

As propriedades magnéticas das rochas podem ser bastante variáveis dependendo da sua composição química, dimensão do grão, temperatura, pressão, condições de deposição, cristalização e história geológica (Carmichael, 1982).

Neste capítulo abordam-se alguns conceitos inerentes a esta metodologia de trabalho, como campo magnético terrestre, propriedades magnéticas como a suscetibilidade magnética, magnetização e estados magnéticos. Anomalias magnéticas, correção, redução de dados e equipamentos magnéticos (suscetibilímetro e magnetómetro de protões) são também referidos neste capítulo.

### 5.2 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Os materiais são compostos por partículas elementares, protões, eletrões e neutrões, que ocupam determinada posição atómica. Os eletrões, movimentam-se em torno do seu eixo ou em volta de um núcleo atómico, promovendo a criação de um campo magnético,  $H$ .

Quando um material não é exposto a um campo magnético, a carga elétrica encontra-se aleatoriamente orientada. Por outro lado, quando o material é sujeito a um campo magnético, a configuração eletrónica dos átomos coincide com a do campo

magnético atuante. A carga elétrica que resulta dessa influência define-se por o momento magnético.

O campo magnético pode ser definido pela seguinte expressão:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

Sendo  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vazio;  $B$  o campo magnético induzido;  $H$  campo magnético e  $M$  magnetização (Freitas, 2010; Santos, 2013)

O Campo Magnético Terrestre (CMT) varia com a amplitude e direção, assemelha-se a um modelo dipolar e pode ser observado como um conjunto de linhas de força que saem de um extremo do íman, chamado polo norte e reingressam no outro extremo, o polo sul, rodeando o planeta terra e estendendo-se infinitamente. (Figura 18). O eixo desse dipolo magnético faz um ângulo aproximado de  $11^\circ$  com o eixo de rotação da Terra (Kearey *et al.*, 2002).

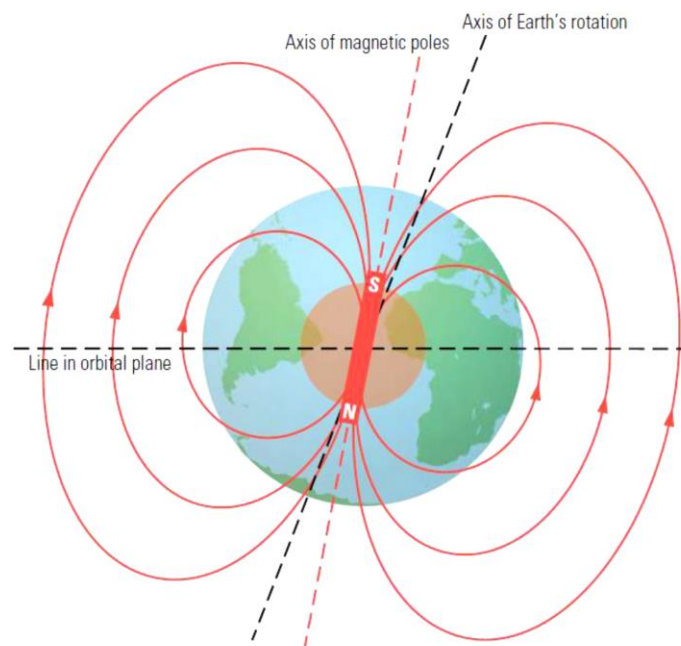


Figura 18 - Campo Magnético Terrestre simplificado. (Buchanan, *et al.*, 2013 in Correia, 2011)

De forma a vectorialmente o campo magnético terrestre tem que se ter em conta as componentes de declinação, de intensidade e de inclinação magnética.

### 5.2.1 DECLINAÇÃO MAGNÉTICA

A declinação magnética corresponde ao ângulo medido num plano horizontal entre o Norte Magnético e o Norte Geográfico. Esta pode variar de localização para



localização, contudo também exhibe variações ao longo do tempo, compreendidas entre 2 a 2,5° ao longo de mais de um século, designando-se a este fenómeno de Variação Secular (Correia, 2011).

A declinação em Portugal Continental ronda os 4°W e nos Arquipélagos da Madeira e dos Açores é respetivamente 6°W e 12°W (Figura 19) (Instituto Português do Mar e Atmosfera).

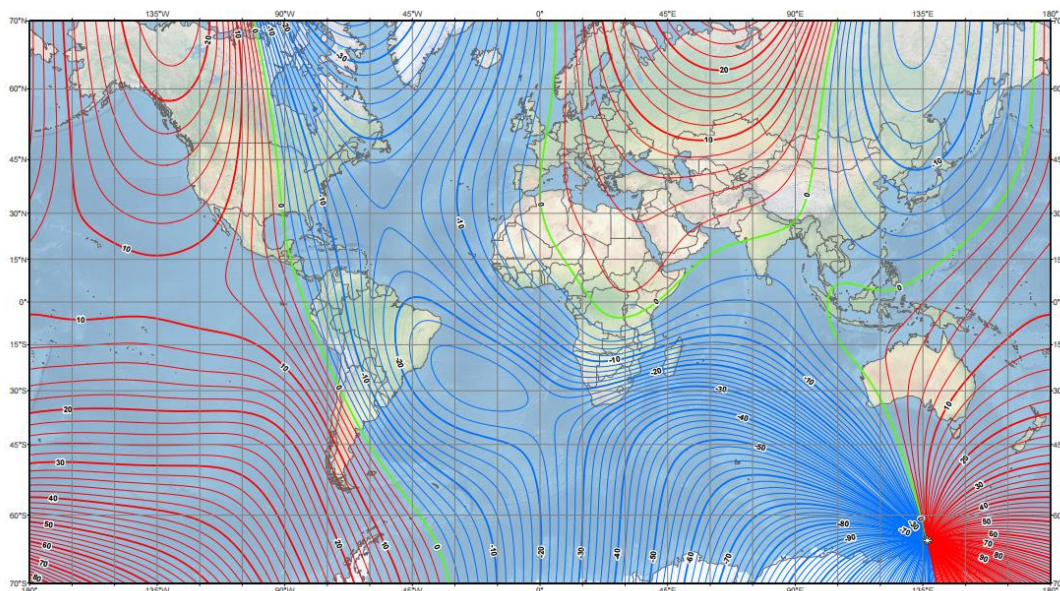


Figura 19 – Mapa da Declinação Magnética do Campo Magnético Principal. Intervalo de curvas: 2°. Curvas a vermelho, declinação positiva; a azul, negativo e verde valores nulos (*World Magnetic Model*).



### 5.2.2 INCLINAÇÃO MAGNÉTICA

A inclinação magnética corresponde ao ângulo entre as linhas de campo magnético e o plano horizontal, num determinado ponto da terra. No equador magnético, a inclinação é  $0^\circ$ , no Polo norte e Polo sul magnético, é  $+90^\circ$  e  $-90^\circ$ , respetivamente. Em Portugal Continental e nos Açores é cerca de  $54^\circ$  e na Madeira  $45^\circ$  (Figura 20) (Instituto Português do Mar e Atmosfera).

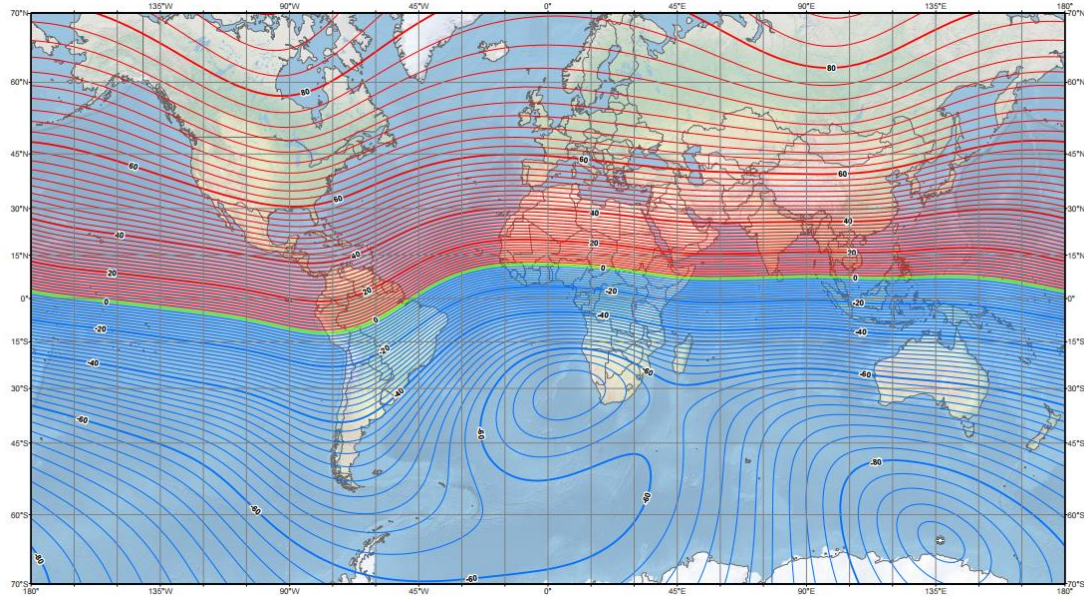


Figura 20 – Mapa de Inclinação Magnética do Campo Magnético terrestre. Intervalo de curvas:  $2^\circ$ . Curvas a vermelho, declinação positiva; a azul, negativo e verde valores nulos (World Magnetic Model).

### 5.2.3 INTENSIDADE DO CMT

As unidades de intensidades do Sistema Internacional são o nano-tesla (nT). A intensidade do CMT tende a decrescer dos polos para equador, variando entre os 24000 e os 66000 nT. Em Portugal Continental e no Arquipélago dos Açores, a intensidade do CMT é 44000 nT, No Arquipélago da Madeira é 40000 nT (Figura 21) (Instituto Português do Mar e Atmosfera).

Presentemente, a intensidade do CMT tem vindo a sofrer um forte decréscimo, podendo ser explicado pela proximidade de uma inversão de campo magnético (Kearey *et al.*, 2002).

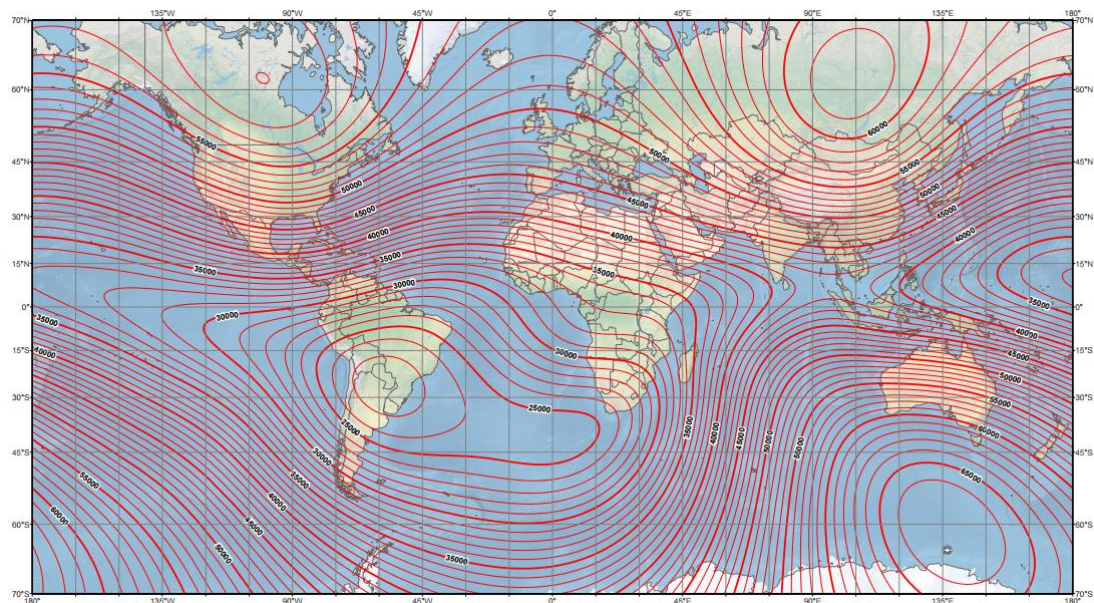


Figura 21 – Mapa de Intensidade Magnética do Campo Magnético Terrestre principal. Intervalo de curvas 1000nT (World Magnetic Model).

## 5.3 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

### 5.3.1 INTENSIDADE MAGNÉTICA OU MAGNETIZAÇÃO

A magnetização ou intensidade magnética pode ser caracterizada como o alinhamento de dipolos ou de momentos magnéticos associados a correntes circulares.

O valor do momento magnético (soma de todos os momentos magnéticos atómicos e/ou moleculares),  $M$ , por unidade de volume,  $V$ , define a magnetização,  $J$ , exemplificada na seguinte equação:

$$J = \frac{\sum M}{V}$$

As rochas possuem uma determinada magnetização que podem ter duas origens, uma induzida e outra remanescente, também conhecida por permanente. A soma destes dois tipos de magnetização é denominada por magnetização total (Freitas, 2010; Santos, 2013).

#### 5.3.1.1 MAGNETIZAÇÃO INDUZIDA

A magnetização induzida consiste num efeito combinado do comportamento magnético do material. Este comportamento é condicionado pela forma e orientação do material em relação ao CMT.

Quando o objeto apresentar uma forma alongada e o seu eixo maior se encontrar alinhado com o CMT, a máxima indução realiza-se apresentando a direção do CMT.

É importante ter em conta que, uma vez que o campo magnético da Terra varia de lugar para lugar, a anomalia magnética de um corpo vai variar de acordo com a sua localização (Silva, 2013; Kearey *et al.*, 2002).

#### 5.3.1.2 MAGNETIZAÇÃO REMANESCENTE

Uma rocha no decorrer da sua formação e história geológica poderá ter tido várias orientações relativamente ao CMT e ser sujeito a diferentes intensidades do mesmo.

Portanto, quando uma rocha é submetida ao CMT, pode adquirir a orientação deste, contudo, essa rocha conservará a orientação da magnetização remanescente primária, alcançada na sua formação (Silva, 2013; Kearey *et al.*, 2002).

### 5.3.2 SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA

A suscetibilidade magnética é uma medida que caracteriza um material de acordo com a resposta a um campo magnético aplicado e expressa a capacidade de o material adquirir magnetização. Dito de outra forma, quanto maior a suscetibilidade magnética, maior será a magnetização do material (Imhmed, 2012).

Quando um material é exposto à ação dum campo magnético (H), adquire uma magnetização induzida, M. A magnetização induzida e o campo magnético H estão relacionados através da suscetibilidade magnética, K (Sant'Ovaia, 2000).

Este processo é traduzido em matematicamente do seguinte modo:

$$M = K H$$

O campo magnético e a magnetização induzida apresentam as mesmas unidades, A/m (ampere por metro, no Sistema Internacional, SI), o que converte a suscetibilidade magnética numa grandeza adimensional (Kearey *et al.*, 2002; Santos, 2013; Correia, 2011).

A suscetibilidade magnética de cada mineral depende do seu comportamento magnético e é o principal parâmetro magnético usado na interpretação geofísica. A suscetibilidade varia grandemente para o mesmo tipo de rocha e depende principalmente do tamanho de grão, da mineralogia magnética e da temperatura. A suscetibilidade magnética das rochas comuns é de modo geral proporcional ao conteúdo de magnetite (< 10% em volume). Quando as rochas apresentam uma suscetibilidade magnética superior a  $1000 \times 10^{-6}$  SI, contêm magnetite, caso contrário, se esta for inferior a  $1000 \times 10^{-6}$  SI não possuem magnetite (Apontamentos de aulas do Seminário de Especialidade inserida no Mestrado em Geologia “Teoria do *fabric* magnético e ASM”, 2016)

### 5.3.3 DIFERENTES ESTADOS MAGNÉTICOS

O magnetismo da matéria é traduzido pelo movimento de eletrões num átomo que origina momentos magnéticos.

Os átomos são constituídos por protões, neutrões e eletrões; os protões e neutrões constituem o núcleo e os eletrões definem trajetórias à volta do mesmo. Para além do movimento orbital em torno do núcleo, os eletrões executam o movimento de *spin*. Este movimento é definido pela rotação dos eletrões em torno de um eixo que passa pelo seu centro. O momento orbital e o movimento de *spin* originam um momento magnético (Sant'Ovaia, 2000).

Em função do arranjo dos momentos magnéticos podem-se considerar cinco estados magnéticos principais, o diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Figura 22) (Lowrie, 2007).

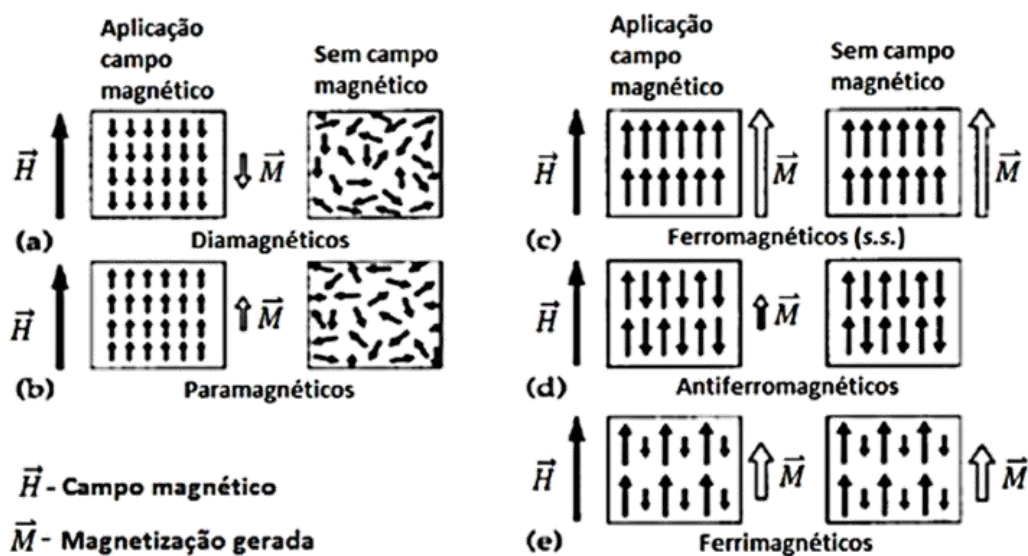


Figura 22 - Diferentes estados magnéticos quando aplicado um campo magnético e após a remoção do mesmo (Extraído de Tarling & Hrouda, 1993 in Correia, 2011).

#### 5.3.3.1 DIAMAGNETISMO

Um material diz-se diamagnético quando a sua suscetibilidade é negativa (na ordem de  $10^{-6}$  SI), isto é, quando aplicado um campo magnético,  $H$ , os materiais diamagnéticos adquirem uma magnetização induzida,  $M_i$ , oposta ao campo aplicado. A magnetização desaparece quando o campo magnético aplicado é removido (Kearey *et al.*, 2002; Sant'Ovaia, 2000).



Nos materiais diamagnéticos, todas as camadas eletrónicas encontram-se totalmente preenchidas e o momento magnético resultante é nulo. A suscetibilidade diamagnética é reversível, fraca e negativa e é independente da temperatura.

Os materiais diamagnéticos mais comuns existentes na crosta terrestre são a minerais como, quartzo e feldspatos, e rochas como os calcários, mármore e evaporitos (Lowrie, 2007).

### 5.3.3.2 PARAMAGNETISMO

Os materiais paramagnéticos apresentam uma suscetibilidade, fracamente, positiva (na ordem de  $10^{-5}$  SI). Estes incluem átomos com momentos magnéticos não nulos devido à presença de *spins* de electrões não-emparelhados.

A magnetização induzida é paralela à direção do campo aplicado, produzida pelo alinhamento dos momentos magnéticos. Quando o campo magnético é removido, a magnetização é reduzida a zero (Sant'Ovaia, 2000)

Os minerais paramagnéticos mais típicos são os silicatos que contêm iões  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , como por exemplo, a biotite, clorite, anfíbois, piroxenas, granadas, cordierite e turmalina.

### 5.3.3.3 FERROMAGNETISMO

A principal distinção entre o ferromagnetismo e outros comportamentos mencionados anteriormente, é a manutenção da conservação do alinhamento magnético nos materiais, após a remoção do campo magnético. Estes materiais produzem fortes respostas magnéticas.

Nos materiais ferromagnéticos, os valores de suscetibilidade variam entre  $10^{-3}$  e  $10^0$ .

O Ferromagnetismo (*sensu lato*) pode ser dividido em três tipos: ferromagnetismo (*sensu stricto*), antiferromagnetismo e ferrimagnetismo (Silva, 2013).

- **Ferromagnetismo (*sensu stricto*):** O alinhamento magnético nos materiais ferromagnéticos apresenta a mesma direção do campo magnético, produzindo uma magnetização bastante elevada. Há manutenção da magnetização remanescente (Silva, 2013).

Os materiais ferromagnéticos incluem o ferro, o cobalto e o níquel, e raramente ocorrem naturalmente na crosta da Terra (Kearey *et al.*, 2002).

- **Antiferromagnetismo:** Os materiais antiferromagnéticos exibem uma suscetibilidade baixa, contudo muito estável (Lowrie, 2007).

Estes exibem um alinhamento magnético paralelo com sentidos opostos, originando uma magnetização de baixa intensidade. Depois da remoção do campo magnético, a suscetibilidade magnética anula-se (Silva, 2013).

Um exemplo de um mineral antiferromagnético é a hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

- **Ferrimagnetismo:** Nos materiais ferrimagnéticos, o conjunto de domínios apresenta diferentes direções, sendo que uma é mais fraca do que a outra.

A magnetite, a titanomagnetite, a ilmenite e os óxidos de ferro e titânio são exemplos de minerais naturais deste tipo, praticamente constituem todos os minerais responsáveis pelas propriedades magnéticas (Kearey *et al.*, 2002).

## 5.4 MAGNETISMO DAS ROCHAS E MINERAIS

Uma compreensão do magnetismo do ambiente geológico e as causas geológicas para variações no magnetismo é crucial para fazer interpretações geologicamente realistas de dados magnéticos (Dentith & Mudge, 2014).

Uma rocha pode ser considerada um conjunto heterogéneo de minerais. Minerais como carbonatos ou silicatos, como o quartzo e os feldspatos, apresentam carácter diamagnético. Porém existe uma quantidade menor de minerais secundários (como minerais de argila) que exibem propriedades paramagnéticas e ferromagnéticas (Lowrie, 2007).

Uma pequena fração ou mesmo mínima de minerais ferromagnéticos desempenha um papel muito importante nas propriedades magnéticas das rochas (Lanza & Meloni, 2006).

Os minerais ferromagnéticos que apresentam maior importância são a magnetite, a titanomagnetite e a hematite.

Os principais fatores que influenciam o magnetismo das rochas são a composição mineralógica, tipo de mineral ferromagnético, a forma e o tamanho de grão, modo de

distribuição nas rochas e o tipo de magnetização remanescente (Dunlop & Ozdemir, 1997; Kearey *et al.*, 2002; Lowrie, 2007).

As rochas ígneas básicas e ultrabásicas exibem, usualmente, altas suscetibilidades magnéticas, devido ao teor elevado de magnetite. A proporção de magnetite tende a diminuir com o aumento da acidez, ou seja, a suscetibilidade é reduzida para rochas ácidas como o granito (Kearey *et al.*, 2002).

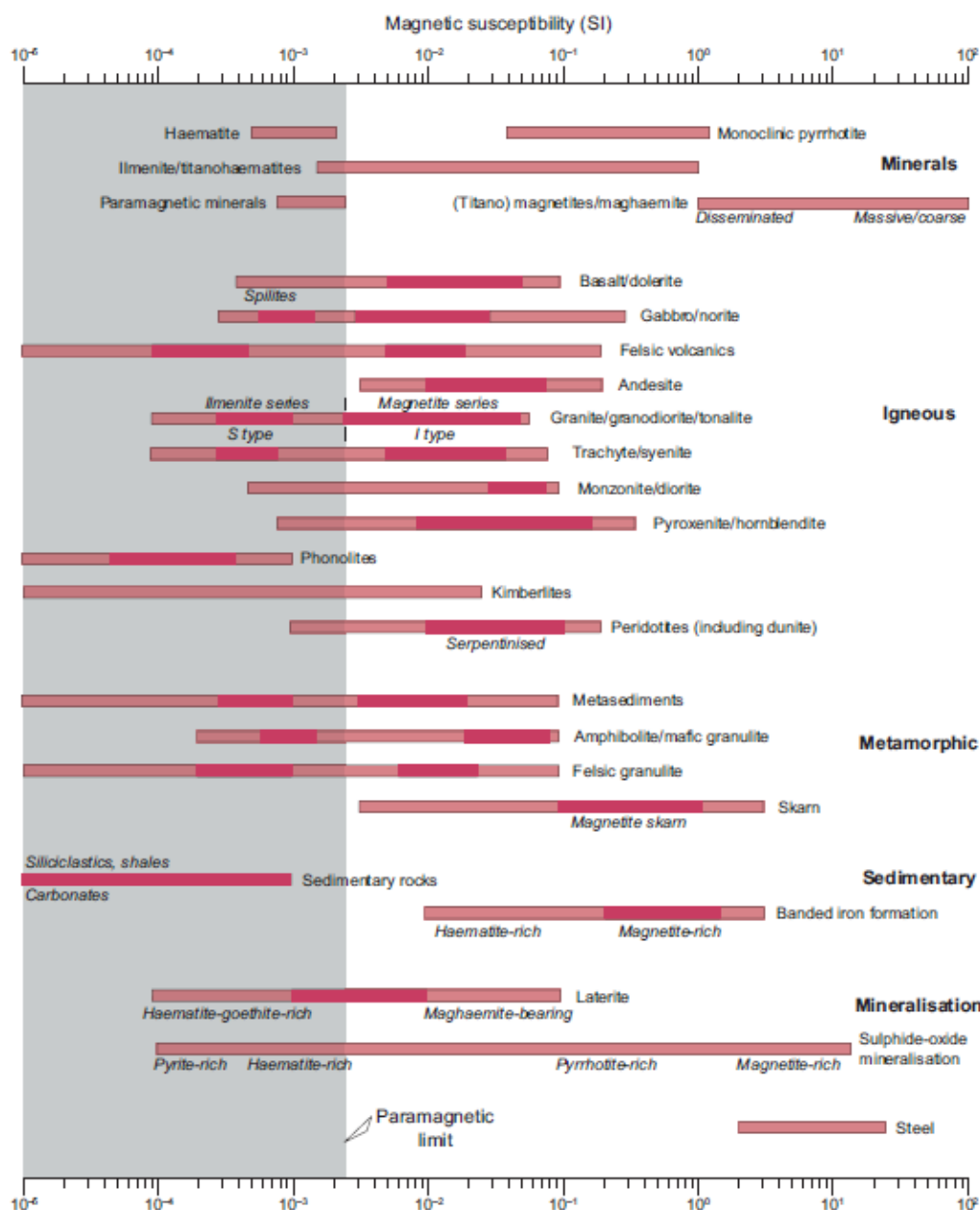


Figura 23 – Variação da Suscetibilidade nos diferentes tipos de rocha e minerais (Extraído de Dentith & Mudge, 2014)



A suscetibilidade magnética das rochas metamórficas é variável, entre intermédia a baixa. Esta depende da disponibilidade de oxigénio durante a sua formação, sendo que quando é abundante verifica-se a formação da magnetite.

Geralmente, as rochas sedimentares apresentam suscetibilidades muito baixas e as formações sedimentares, raramente produzem grandes anomalias magnéticas. Caso ocorra uma anomalia de suscetibilidade magnética é devida a um corpo ígneo em profundidade (Figura 23). As rochas ígneas e metamórficas apresentam suscetibilidades magnéticas mais elevadas (Kearey *et al.*, 2002).

## 5.5 ANOMALIAS MAGNÉTICAS

Uma anomalia define-se pela diferença entre o valor real da intensidade do campo magnético terrestre e o valor médio calculado através de um magnetómetro local imóvel. As anomalias magnéticas consideram-se positivas quando o valor da intensidade do campo magnético terrestre é maior que o calculado através de um magnetómetro imóvel, e negativas quando se verifica o inverso.

Se o campo aplicado foi muito maior do que o campo da Terra, o valor obtido pode não ser adequado para interpretar anomalias magnéticas. Essas anomalias são utilizadas como ferramenta na geologia, nomeadamente, na cartografia de estruturas e na identificação de concentrações minerais para exploração. A relação entre as anomalias e a petrologia magnética do corpo ou região de origem nem sempre é muito clara, geralmente, porque a fonte não pode ser relacionada diretamente (Dunlop & Ozdemir, 1997).

Comummente, as principais causas de anomalias magnéticas são a presença de falhas, fluxos de lava, soleiras, diques, rochas metamórficas, intrusões básicas e corpos minerais ricos em magnetite (anomalias de grande amplitude). Portanto, as anomalias magnéticas podem ser usadas para obter informações indiretas sobre estruturas geológicas e tectónicas levando ao conhecimento pormenorizado das camadas superficiais do nosso planeta.

A anomalia magnética de um corpo contém invariavelmente elementos positivos e negativos decorrentes da natureza dipolar do magnetismo.

A intensidade magnética é um vetor e a direção de magnetização de um corpo controla, fortemente, a forma de anomalias magnéticas. Por estas razões as anomalias magnéticas estão frequentemente muito menos relacionadas com a forma do corpo, ou seja, os corpos de forma idêntica podem dar origem a diferentes anomalias magnéticas (Lanza & Meloni, 2006; Kearey *et al.*, 2002).

## 5.6 REDUÇÃO E CORREÇÃO DE DADOS

As análises sucessivas do campo magnético terrestre ao longo do tempo, em observatórios, demonstram que as médias anuais das componentes do campo exibem uma variação lenta, mas muito expressiva.

Por isso, na redução e correção dos dados magnéticos é necessário remover todas as causas de variação magnética das observações, com a exceção dos efeitos magnéticos do subsolo. As principais variações e correções que se tem que ter em atenção são a variação secular, variação diurna, correção geomagnética e correção de elevação (Kearey *et al.*, 2002).

### 5.6.1 VARIAÇÃO SECULAR

A variação secular é um fenómeno quem tem como consequência a variação da declinação magnética ao longo dos anos, bem como da intensidade do campo.

Esta variação é recalculada a cada quinquénio e materializa o período de validade do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF).

### 5.6.2 VARIAÇÃO DIURNA

A variação diurna tem um grande efeito sobre os dados magnéticos, por isso são rotineiramente monitorados durante o levantamento (Dentith & Mudge, 2014).

Esta variação apresenta uma mudança gradual, tanto no espaço como no tempo, dependendo do local de medição (posição geográfica) e é, periodicamente, registada por observatórios fixos. A variação tem um período de 24 horas, correlacionando-se com o movimento de rotação da terra.

No verão, as amplitudes desta variação são mais intensas. As duas formas de variação diurna são os seguintes: dia calmo e dia perturbado. A variação de dia calmo é suave, regular e apresenta baixa amplitude (aproximadamente de 20-80 nT), por outro lado, a variação de dia perturbado é menos regular, mais rápida, de grande amplitude (aproximadamente 1000 nT) e encontra-se relacionada com tempestades magnéticas, devendo-se a intensa atividade solar, sendo que nestes dias não se podem fazer levantamentos magnéticos (Kearey *et al.*, 2002).

### 5.6.3 VARIAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

A variação do campo magnético terrestre resulta de alterações do domínio externo, estando relacionadas com fontes externas ao nosso planeta. Na análise magnética, o IGRF é usado para remover o campo teórico do campo total (valor medido pelo magnetómetro). A complexidade do IGRF requer o cálculo das correções por computador (Dentith & Mudge, 2014).

### 5.6.4 VARIAÇÃO DE ELEVAÇÃO E TERRENO

O campo magnético terrestre apresenta um gradiente vertical de  $0.03 \text{ nTm}^{-1}$ , nos polos e  $-0.015 \text{ nTm}^{-1}$ , no equador. Por isso a correção de elevação e terreno, normalmente, não é aplicada.

A influência da topografia pode ser significativa no levantamento magnético do terreno, mas não é totalmente previsível, uma vez que depende das propriedades magnéticas e das características topográficas.

Posteriormente à aplicação das correções diurnas e geomagnéticas, todas as variações do campo magnético restantes devem ser causadas unicamente por variações espaciais nas propriedades magnéticas do subsolo, sendo referidas como anomalias magnéticas (Kearey *et al.*, 2002).

## 5.8 MÉTODOS E METODOLOGIAS

### 5.8.1 SUSCETIBILÍMETRO

O suscetibilímetro magnético KT-10 Terraplus (Figura 24) é um medidor portátil projetado para medições em afloramentos, sondagens e amostras de rochas. O KT- 10 pesa 3 kg e a sua bobine indutiva tem um diâmetro de 65 mm, correspondendo a uma área total de 3318 mm<sup>2</sup> do sensor e apresenta-se localizada na extremidade do instrumento.

O KT-10 utiliza um oscilador LC 10 kHz com uma bobine indutiva para medir a suscetibilidade magnética. O cálculo da suscetibilidade corresponde à diferença entre a frequência da amostra e as medições ao ar livre. A frequência do oscilador é extremamente sensível a mudanças e desvios de temperatura e para esses efeitos serem minorados, têm que se fazer várias medições em ar livre, anterior e posteriormente à medição no afloramento ou amostra.

O KT-10 pode ser utilizado de duas formas, através do bloco padrão que é equivalente ao diâmetro de bobine indutiva ou de um pino acoplado, que mantém o medidor paralelo à superfície da rocha, aumentando a precisão sobre as amostras irregulares.

Este medidor utiliza uma frequência de funcionamento de 10 kHz com uma sensibilidade de  $1 \times 10^{-6}$  unidades SI. (Terraplus - Magnetic Susceptibility).



Figura 24 - Susceptibilímetro Magnético KT-10 Terraplus. Fonte: [http://hasahill.com.br/wp-content/uploads/2013/02/KT-10\\_Plus\\_Magnetic\\_Susceptibility\\_Meter\\_The\\_Coretray\\_Company-700x300.jpg](http://hasahill.com.br/wp-content/uploads/2013/02/KT-10_Plus_Magnetic_Susceptibility_Meter_The_Coretray_Company-700x300.jpg)

### **5.8.1.1 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS**

Com o objetivo de elaborar mapas e gráficos demonstrativos da variação espacial da suscetibilidade magnética, foram recolhidas medidas de suscetibilidade magnética no campo.

As medições foram efetuadas com um equipamento portátil e foram realizadas em contato com a rocha. Durante o estudo foram executadas dez medições em cada local de interesse do afloramento, das dez medições foram retiradas o máximo e o mínimo de cada local, com os valores das restantes 8 medições, foi realizada a média aritmética. Para cada um desses locais retiraram-se as coordenadas GPS

Todas as medidas realizadas encontram-se na Tabela 4 no Anexo 1.

### 5.8.2 MAGNETÓMETRO

O magnetómetro de protões é um equipamento simples, que mede as variações da intensidade do campo magnético. É um instrumento absoluto porque se baseia na ressonância magnética dos núcleos dos átomos de hidrogénio ou cézio, contidos num reservatório (sensor), que contém um líquido no seu interior. Quando são submetidos a um campo magnético, medem a intensidade do mesmo.

Os protões numa amostra de água, petróleo, álcool, entre outros, comportam-se como pequenos dipolos magnéticos, girando. Estes ímanes são temporariamente alinhados ou polarizados por aplicação de um campo magnético uniforme gerado por uma corrente de uma bobine (Correia, 2015).

Quando a corrente é removida, a rotação dos protões faz com que eles precessem segundo a direção do campo magnético da Terra.

Os protões de precessão, em seguida, geram um pequeno sinal na mesma bobine usada para polarizar, cuja frequência é precisamente proporcional à intensidade total do campo magnético e independente da orientação da bobine, isto é, o sensor do magnetómetro (Breiner 1999).

O magnetómetro de protões baseia-se no seguinte princípio físico: a energia magnética de um núcleo de um átomo de hidrogénio colocado num campo magnético ambiente  $\vec{B}$  só pode assumir um conjunto discreto de valores múltiplos de:

$$\Delta E = \frac{h\gamma B}{2\pi}$$

Em que  $B$  é o módulo de  $\vec{B}$ ,  $h$  é a constante de Planck e  $\gamma$  é a constante giromagnética do protão, cujo valor é conhecido com muita precisão ( $\gamma = 0,26753$  Hz/nT) (Notas da unidade curricular Geomagnetismo 2009).

No presente trabalho o magnetómetro utilizado é o Magnetómetro DeepGeoTech, que foi concebido para medir o campo magnético da Terra. Neste magnetómetro, os objetos e características geológicas podem ser detetados devido à perturbação que estes causam no campo magnético local. É um instrumento moderno com recetor e armazenamento de dados num cartão de memória (SD) e apresenta posicionamento global por satélite (GPS). O microprocessador fornece uma leitura direta da magnitude do campo magnético local diretamente em unidades nano-Tesla (nT). O magnetómetro mede o campo magnético da Terra com alta resolução e grava cada leitura, juntamente

com as coordenadas GPS num arquivo. Este instrumento consiste em dois constituintes principais: o painel de instrumentos e o sensor com cabo (Figura 25) (Olsen, 2013).



Figura 25 - Magnetómetro de prótons DeepGeoTech, à direita o sensor com cabo e à esquerda o painel de instrumentos. (Olsen 2013)

O magnetómetro de prótons não tem partes móveis, produz uma resolução de medição absoluta e relativamente alta e geralmente exibe a medição sob a forma de uma leitura inequívoca digital (Breiner, 1999).

São os instrumentos mais utilizados na aquisição de dados geomagnéticos, tendo uma precisão que varia entre 0,1 nT ( $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$ ) e 1,0 nT. A sua sensibilidade é cerca de 10 vezes superior.

As principais aplicações deste método são nas seguintes áreas: exploração mineral, pesquisa magnética para fins industriais, ambiental ou arqueológico (Notas da unidade curricular Geomagnetismo 2009, Correia 2015).



### **5.8.3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS**

A aquisição dos dados magnéticos na área foi realizada com o auxílio de um magnetómetro de protões.

A recolha de dados foi levada a cabo com o intuito de detetar uma estrutura mineralizada em antimónio na parte norte da área de estudo (Lagoa Negra – Rates). Esta recolha foi realizada ao longo dos caminhos existentes na área, contendo tentou-se percorrer uma malha de caminhos que pudesse cobrir a estrutura. Para facilitar as idas ao campo foi realizado um reconhecimento prévio da área, através de imagens de satélite.

Os dados foram adquiridos com um espaçamento automático tendo-se registado um total de 5655 pontos no final da aquisição.

### 5.8.3.2 TRATAMENTO DE DADOS

#### 5.8.3.2.1 CORREÇÃO DA VARIAÇÃO DIURNA

A recolha de dados foi efectuada a diferentes horas ao longo de vários dias, por essa razão foi fundamental ter em conta a influência da variação diurna, realizando a correção do campo magnético. Todas as medições efetuadas foram recalculadas à data 24 de maio de 2016, como se todas elas tivessem sido recolhidas ao mesmo tempo.

A correção iniciou-se com remoção de todos os ruídos, nomeadamente, os dados recolhidos na zona industrial, em postes e raies da estrada. Posteriormente, recorreu-se ao cálculo da média móvel com o intuito de suavizar todos os dados, retirando os ruídos, representados pelos os valores mais elevados.

Num local foram realizadas duas medições ao longo do dia, de modo a observar as oscilações dos valores do campo magnético desse dia (24 de maio de 2016) (Figura 26).

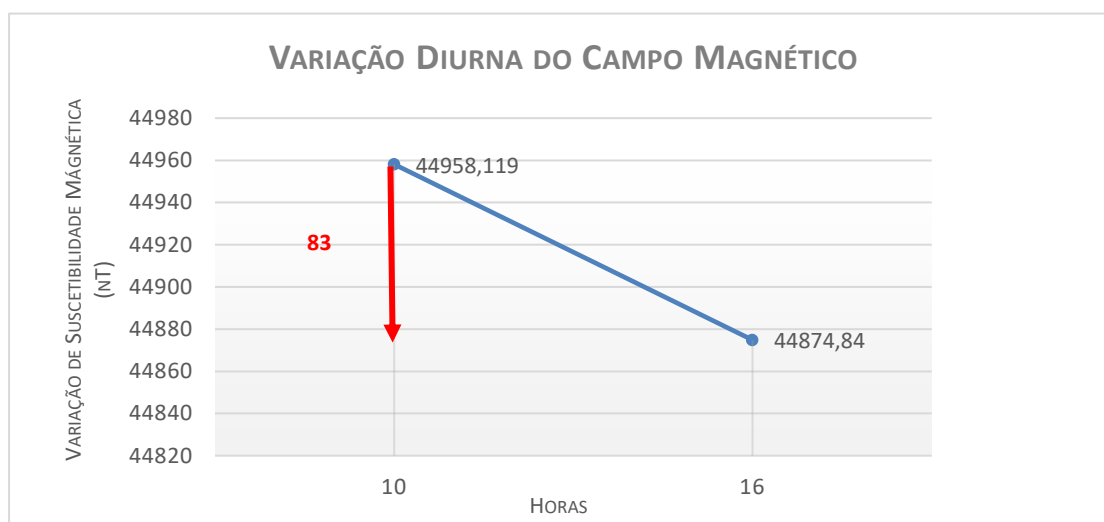


Figura 26 – Variação do Campo Magnético ao longo do dia entre as 10h e as 16h do dia 24 de Maio.

Com as medições realizadas no dia 24 de maio de 2016 às 10h e 16h no mesmo local, é possível verificar na Figura 26 que o campo magnético diminui ao longo do dia, entre as 10 e as 16h, cerca de 83 nT. Como o campo magnético diminui ao longo do dia é necessário somar esse valor a todos os dados, como se todos fossem recolhidos no mesmo dia.

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISE ESPACIAL

### 6.1 INTRODUÇÃO

### 6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

### 6.3. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL

## 6. ANÁLISE ESPACIAL

### 6.1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Informação Geográficos (SIG) são sistemas baseados em computadores que são utilizados para armazenar e manipular informações geográficas, são projetados para a recolha, armazenamento e análise de objetos e fenómenos onde a localização geográfica é uma característica importante ou essencial para a análise (Documentos unidade curricular Sistemas de Informação Geográfica 2014/2015).

A análise espacial é uma ferramenta que possibilita manusear dados espaciais de diferentes formas e extrair conhecimento adicional, sendo que abrange funções básicas como consulta de informações espaciais dentro de áreas de interesse definidas, manipulação de mapas e a produção de alguns breves sumários estatísticos dessa informação e incorpora também funções como a investigação de padrões e relacionamentos dos dados na região de interesse, pretendendo uma melhor compreensão de um fenómeno (Bailey, 1994; Rocha 2004 *in* Cruz & Campos, 2000).

A geocomputação e a estatística espacial são as duas vertentes principais da análise espacial. A primeira utiliza técnicas para analisar grandes bases de dados e gerar resultados experimentais com melhor qualidade do que técnicas convencionais, mas com vasta aplicabilidade prática. A segunda concebe modelos matemáticos de distribuição e correlação, incorporando propriedades de significância e incerteza, resultantes da dimensão espacial (Câmara, 2000; Meneses 2003 *in* Cruz & Campos, 2000).

Desta forma, a análise espacial é um dos aspetos mais importantes nos processos de criação de informação com o recurso de tecnologias de geoprocessamento.

Considerando o caso da exploração mineira, a análise espacial é usada, principalmente, com o intuito de delinear alvos de exploração mineira numa atividade de cartografia da escala regional à local, a delimitação do alvo envolve a recolha, a análise e a integração de vários dados de geociências previstos para extrair geoinformação espacial, em cada uma daquelas escalas (Carranza, 2011).

Alguns depósitos minerais exibem um padrão espacial não aleatório, essencialmente porque a génese desses depósitos minerais é controlada pela combinação de alguns processos geológicos conhecidos. Em todo o mundo, a associação espacial entre depósitos minerais e certas características geológicas é

evidente, mas definitivamente não acontece com todos eles (Carranza, 2009a). É precisamente por causa destas inter-relações observadas entre os depósitos minerais e determinadas características geológicas que a análise do padrão espacial pode fornecer geo-informação espacial experimental, que possivelmente melhorará a compreensão conceitual dos sistemas de minerais (Carranza, 2009b).

Um modelo conceitual dos controlos geológicos sobre a mineralização é geralmente uma síntese da experiência de exploração, a análise qualitativa (isto é, a revisão do conhecimento existente sobre a formação de depósitos de minerais) e análises quantitativas de distribuição espacial das ocorrências de depósito mineral e as suas associações espaciais com certas características geológicas. As análises quantitativas (apoiadas em SIG) são baseadas nas características geológicas gerais de depósitos minerais descritas em modelos e nas características geológicas específicas.

Na definição de um modelo conceitual do potencial de prospeção mineral numa área de estudo, a análise da distribuição espacial das ocorrências de depósitos minerais e análise das suas associações espaciais com certas características geológicas são muito úteis. A análise das associações espaciais entre as ocorrências de depósitos minerais e certas características geológicas é instrutiva na definição e importância relativa de ponderação de determinados recursos geológicos e para ser usado como prova espacial em modelos de previsão do potencial de prospeção mineral.

A associação espacial refere-se à distância ou intervalo de distâncias em que certos tipos de depósitos minerais, que geralmente são representados como pontos, estão de determinadas características geológicas, estas são representadas como pontos, linhas ou polígonos. Esta associação espacial pode ser considerada como dependência espacial; isto é, a ocorrência de certos tipos de depósitos minerais depende dos locais de determinadas características geológicas. Quanto menor a distância de associação espacial, mais forte a dependência espacial.

Estes estudos, normalmente, consideram a litologia, grau metamórfico, grandes estruturas, geometria de corpos geológicos, critérios geofísicos e relações espaciais com o objetivo de construir mapas de prospeção à escala regional (Carranza, 2011).

## 6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição e recolha de dados constituem a primeira fase deste projeto de análise espacial.

Para realizar análise espacial através do software ArcGIS é necessário que diferentes tipos de dados sejam adquiridos. Como foi constatado anteriormente esses dados devem incluir a informação geográfica, para serem projetados e manipulados pelo *software*. A informação geográfica no formato vetorial e *raster* é essencial, por este motivo, as fontes mais comuns de informações são vários tipos de mapas cartográficos e todo o tipo de informação georreferenciada. A informação no formato vetorial é obtida através da digitalização de pontos, linhas e polígonos resultando em *layers* e correspondem a dados cujas coordenadas de pontos e a sequência de coordenadas de vértices de linhas permitem definir a forma e posição dos objetos representados. Os atributos são guardados numa base de dados e a sua aquisição de dados vetoriais é feita essencialmente através de GPS, mesa digitalizadora e digitalização sobre a imagem previamente georreferenciada. A informação no formato *raster* é representada como uma matriz, em que o valor da variável é armazenado em cada espaço rectangular, ou pixel. O tipo mais comum de dados *raster* são mapas digitalizados, fotos aéreas, imagens de satélite, modelos digitais de elevação (DEM), e todos os tipos de mapas de distância e densidade produzidos no *software*. Este tipo de dados é obtido através de sensores ou *scanner* e gerados por cálculo (interpolação, classificação, entre outros) (Documentos unidade curricular Sistemas de Informação Geográfica 2014/2015).

As *layers* e o conteúdo das mesmas encontram-se no datum WGS84 UTM 29N. Os dados usados incluem as:

- *Layer* de pontos (minas de antimónio e antimónio-ouro, sedimentos de corrente, concentrados de bateia);
- *Layer* de linhas (filões de quartzo, filões de dolerito, filões de aplito-pegmatito, falhas e cavalgamentos);
- *Layer* de polígonos (litologia, bacias de drenagem)

Cada uma delas é descrita abaixo, individualmente.

### 6.2.1 LAYER MINAS DE ANTIMÓNIO E ANTIMÓNIO-OURO

O conteúdo da *layer* “Minas antigas de antimónio e antimónio-ouro” (Figura 2) foi compilado usando as seguintes fontes de informação cartas geológicas 1:50 000, folhas: 9A - Póvoa do Varzim (Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1965); 9C – Porto (J. Carrington da Costa, Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1957); 9D - Penafiel (A. Medeiros, Eurico Pereira e Armando Moreira, 1981); 13B - Castelo de Paiva (A. Cândido de Medeiros. Revisão Por Carlos Teixeira, 1963); 14C – Castro D’Aire (L. J. G. Schermerhorn, D. Sluijk, J. Ávila Martins, A. Peinador Fernandes e J. M. Farinha Ramos, 1977) e o WMS das ocorrências minerais do Geoportal do LNEG.

Os dados reunidos nesta *layer* estão representados por pontos e foram adquiridos através da digitalização de todas as minas ativadas e desativadas visíveis nestas cartas. Para apenas serem representadas as minas de Sb e Sb-Au, recorreu-se a uma seleção de atributos e de exportação (Figura 27).

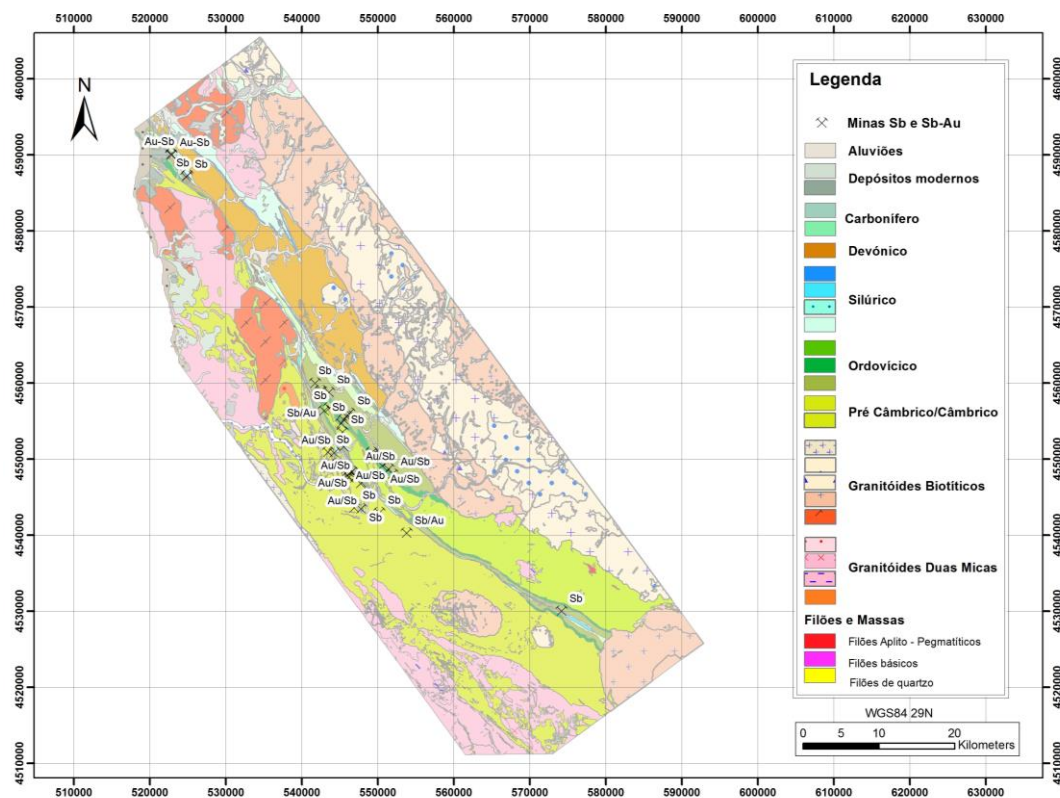


Figura 27 - Layer das minas de antimónio e antimónio e ouro. Datum WGS84 29N

## 6.2.2 LAYER LITOLOGIA

Todas as informações contidas na *layer* “Litologia”(Figura 28) resultam das cartas geológicas 1:50 000, folhas: 9A - Póvoa do Varzim (Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1965); 9C – Porto (J. Carrington da Costa, Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1957); 9D - Penafiel (A. Medeiros, Eurico Pereira e Armando Moreira, 1981); 13A - Espinho (Carlos Teixeira e J. Correia Perdigão, 1962); 13B - Castelo de Paiva (A. Cândido de Medeiros. Revisão Por Carlos Teixeira, 1963); 14A – Lamego (Carlos Teixeira, A. Cândido de Medeiros e A. Peinador Fernandes, 1968); 14C – Castro D’Aire (L. J. G. Schermerhorn, D. Sluijk, J. Ávila Martins, A. Peinador Fernandes e J. M. Farinha Ramos, 1977).

A *layer* resultou da digitalização de polígonos correspondentes à litologia, em primeira instância digitalizou-se todos os contactos litológicos constituindo uma *shapefile* de linhas e posteriormente através de uma *shapefile* de pontos com os atributos de cada litologia, utilizando a ferramenta *Arcinfo – Tools – Data management tools – features - feature to polygone*, geraram-se polígonos com informação sobre a litologia.

A classificação para as diferentes litologias foi feita recorrendo a classificação proposta nas cartas geológicas.

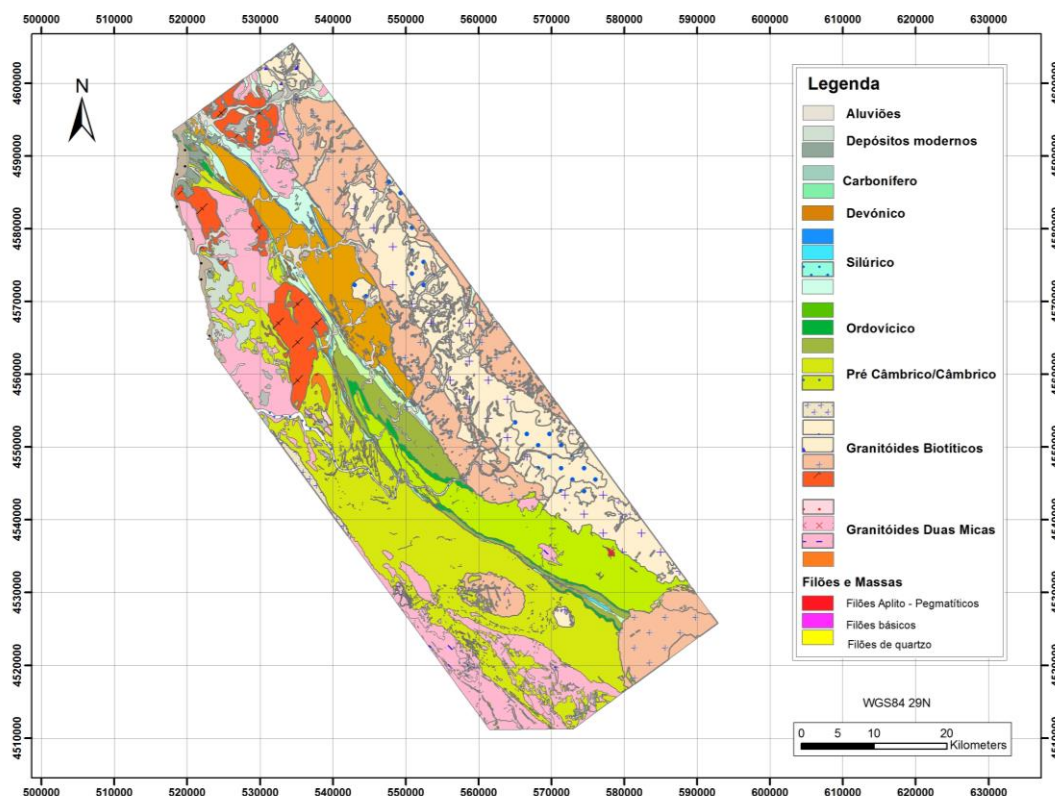


Figura 28 - Layer litologia. Datum WGS84 29N



### 6.2.3 LAYER DE FALHAS E CAVALGAMENTOS

O conteúdo da *layer* das “Falhas e cavalgamentos” (Figura 29) foi compilado usando a Carta Geológica de Portugal 1: 200 000, Folhas nº1 (Pereira *et al.*, 1989) e nº 2 (Pereira *et al.*, 2001).

Procedeu-se à digitalização das falhas e cavalgamentos estabelecendo uma *shapefile* de linhas. O mergulho de falhas individuais era impossível de obter, visto que, essa informação não é fornecida na carta. A única característica que foi possível extrair foi a direção de cada falha e cavalgamento, usando uma extensão do ArcGIS denominada *Easy Calculated* para este cálculo.

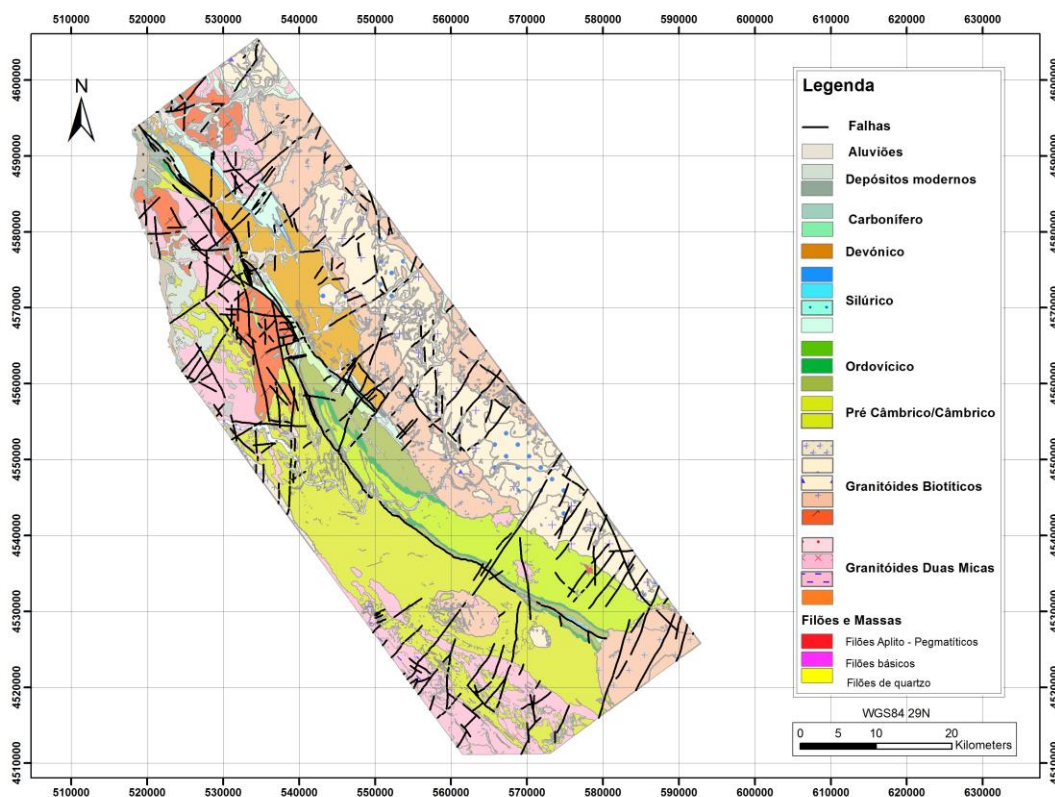


Figura 29 - Layer de falhas e cavalgamentos. Datum WGS84 29N

## 6.2.4 LAYERS FILÕES DE QUARTZO, FILÕES DE DOLERITO E FILÕES DE

### APLITO-PEGMATITO

Constituem três *layers*, “Filões de quartzo, filões de dolerito e filões de aplito-pegmatito” (Figura 30). O conteúdo destas foi adquirido usando a seguinte fonte de informação: Carta Geológica de Portugal 1: 200 000, Folha nº1 (Pereira *et al.*, 1989) e 2 (Pereira *et al.*, 2001) e Carta Geológica de Portugal. Escala 1:50 000 folha 9A- Póvoa do Varzim (Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1965); 9C – Porto (J. Carrington da Costa, Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1957); 9D - Penafiel (A. Medeiros, Eurico Pereira e Armando Moreira, 1981); 13B-Castelo de Paiva (A. Cândido de Medeiros. Revisão Por Carlos Teixeira, 1963); 14C – Castro D’Aire (L. J. G. Schermerhorn, D. Sluijk, J. Ávila Martins, A. Peinador Fernandes e J. M. Farinha Ramos, 1977).

Procedeu-se à digitalização dos filões estabelecendo uma *shapefile* de linhas. A única característica que foi possível extrair foi a direção de cada filão, usando uma extensão do ArcGIS denominada *Easy Calculated* para este cálculo.

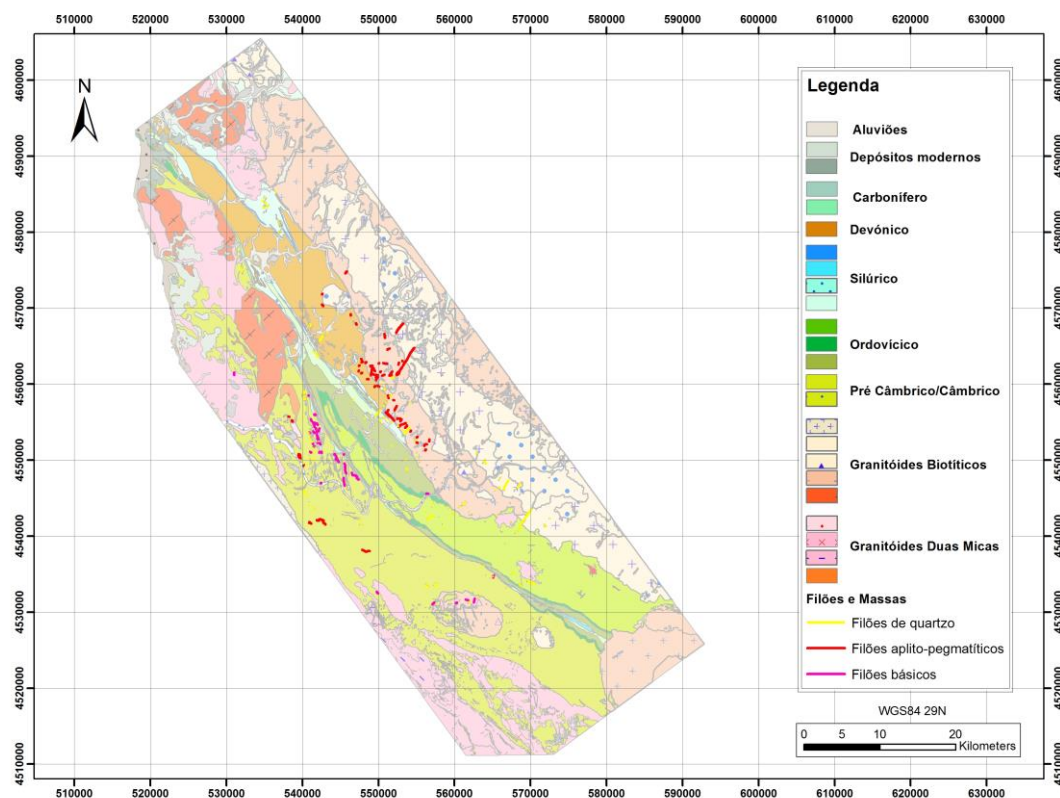


Figura 30 - Layers de filões de quartzo a amarelo, filões de aplito pegmatito a vermelho e filões básicos a rosa. Datum WGS84 29N

## 6.2.5 LAYER DE SEDIMENTOS DE CORRENTE

O conteúdo desta *layer* (Figura 31) foi fornecido em papel, posteriormente e com o devido tratamento foi adicionado ao projeto sob a forma de *shapefile*.

Os dados foram adquiridos através de campanhas de amostragem de sedimentos de corrente e concentrados de bateia elaborados pelo consórcio BRGM/EDM de 1988 a 1990, no Norte de Portugal.

Nas várias campanhas de sedimentos de corrente descritas em relatórios fornecidos, foram colhidas 1673 amostras, tendo sido analisados 35 elementos.

A área de análise constituiu as seguintes zonas: A (São Romão do Coronado) A (Rates), B e C.

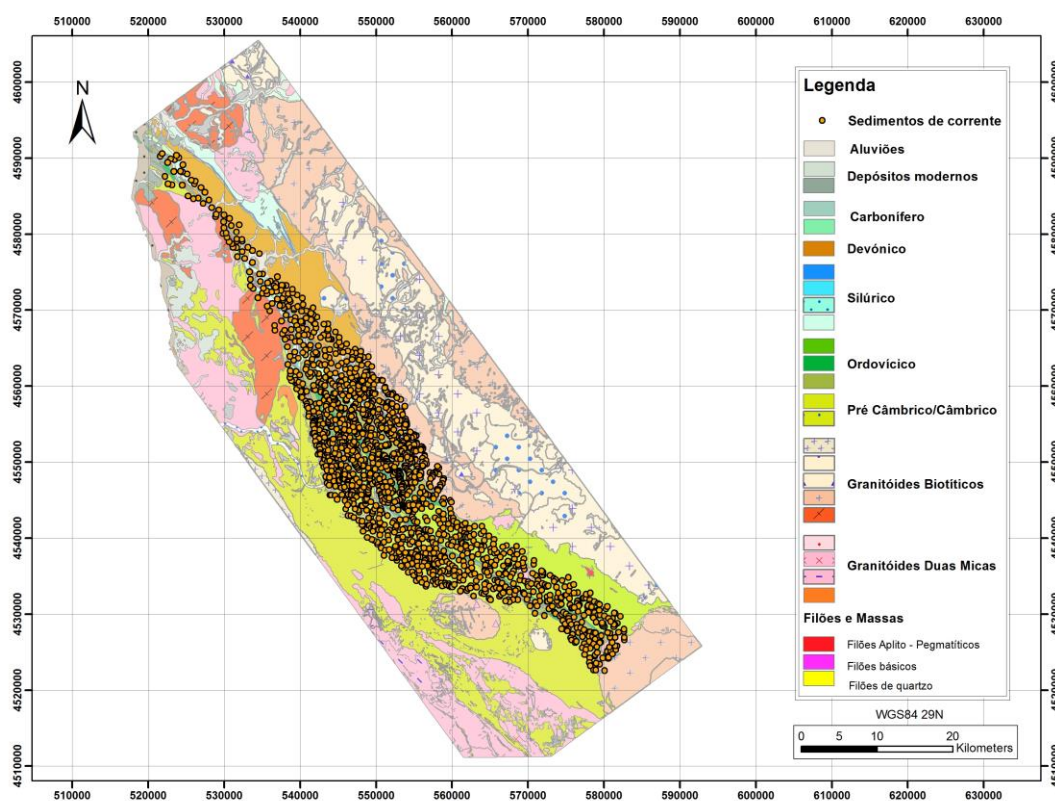


Figura 31 - Layer dos Sedimentos de corrente (1673 amostras). Datum WGS84 29N

### 6.2.6 LAYERS DE CONCENTRADOS DE BATEIA

Os “Concentrados de Bateia” correspondem a três *layers* (Figura 32): concentrados de bateia onde se encontrou ouro, estibina e arsenopirite. A informação desta *layer* foi compilada através dos mesmos relatórios referidos acima e com o devido tratamento foram adicionados ao projeto sob a forma de *shapefile*.

Durante as campanhas de concentrados de bateias foram observadas 15 partículas ou grãos de arsenopirite, 164 de ouro e 16 de estibina.

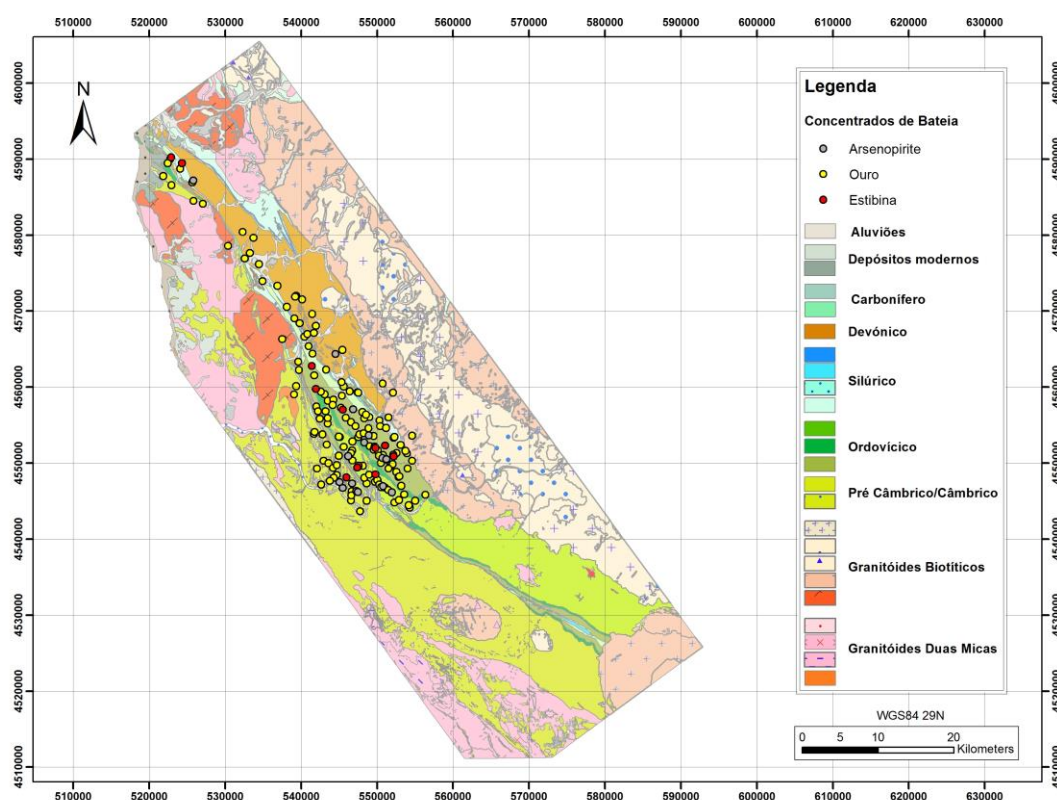


Figura 32 - *Layer* dos Concentrados de bateia, a verde a estibina, amarelo o ouro e a vermelho a arsenopirite. Datum WGS84 29N



## 6.2.7 LAYER BACIAS DE DRENAGEM OBTIDAS ATRAVÉS DE SEDIMENTOS DE CORRENTE

As bacias foram realizadas com o objetivo de confirmar e validar a localização e existência das minas de antimónio e antimónio-ouro e para descobrir novos locais de anomalias em Sb presentes na área de estudo.

Para gerar estas bacias é necessário um modelo digital de escoamento (DEM 25, *flow direction*, Figura 33), tendo este modelo sido facultado pelo Sistema Nacional de Informação de Ambiente da Agência Portuguesa do Ambiente.

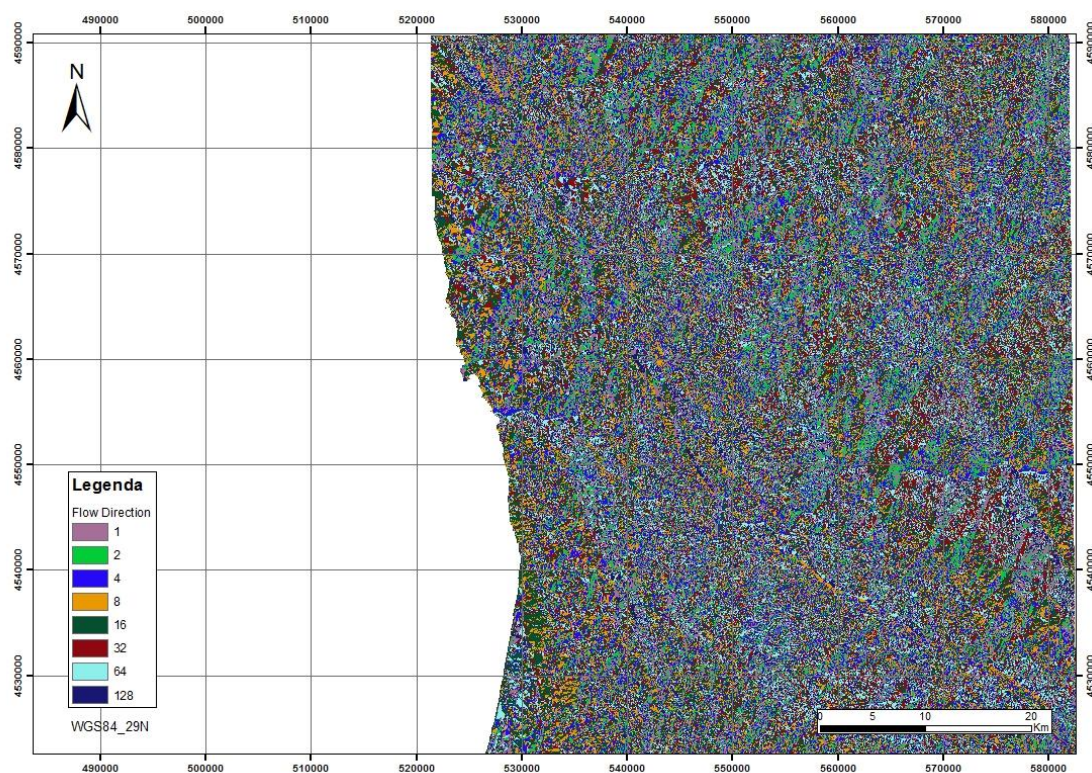


Figura 33 - Modelo digital de escoamento. Datum WGS84\_UTM29N.

O procedimento empregue para a sua realização é o seguinte:

Primeiramente, elabora-se um *flow accumulation* (Figura 34) através do modelo acima referido (*Spatial analyst tools*→*Hydrology*→*Flow accumulation*).

- i. *Input: Flow direction* (este modelo digital de escoamento foi cortado (função *Clip*) representando apenas a área de estudo e facilitando o processamento do software);
- ii. *Output data type: INTEGER*
- iii. Em *environments*, em *Process extent*, definir como “Same layer as Flow direction”, para não existir desfasamentos no modelo realizado;
- iv. Depois de obter o *flow accumulation*, este é dividido em 5 classes (0-10, 10-70, 200-500, 500- $\infty$ ).

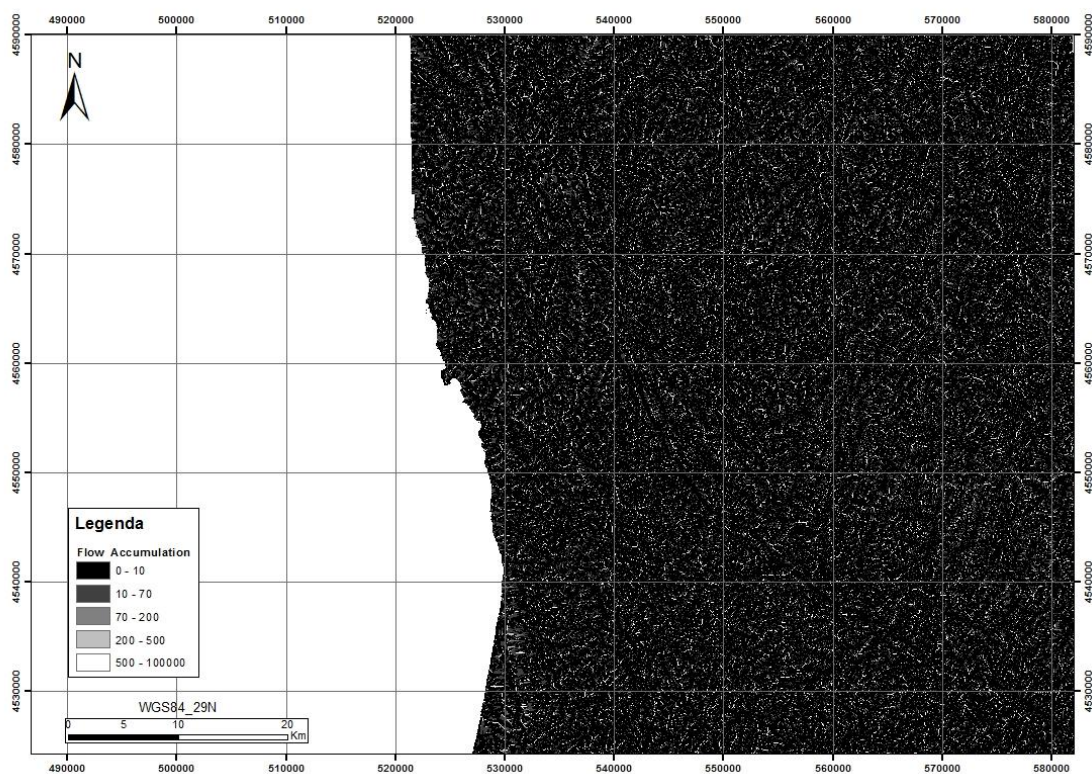


Figura 34 - Modelo de Acumulação de fluxo. Datum WGS84\_UTM29N.

De seguida utiliza-se o modelo elaborado em cima para realizar o *Set Null* (Figura 35) (*Spatial analyst tools*→*Conditional*→*Flow accumulation*).

- i. *Input: Flow accumulation;*
- ii. *Expression: Value <70*
- iii. *Input false raster or constante value: 1;*
- iv. Em *environments*, em *Process extent*, definir como “Same layer as Flow direction”, para não existir desfasamentos no modelo realizado;

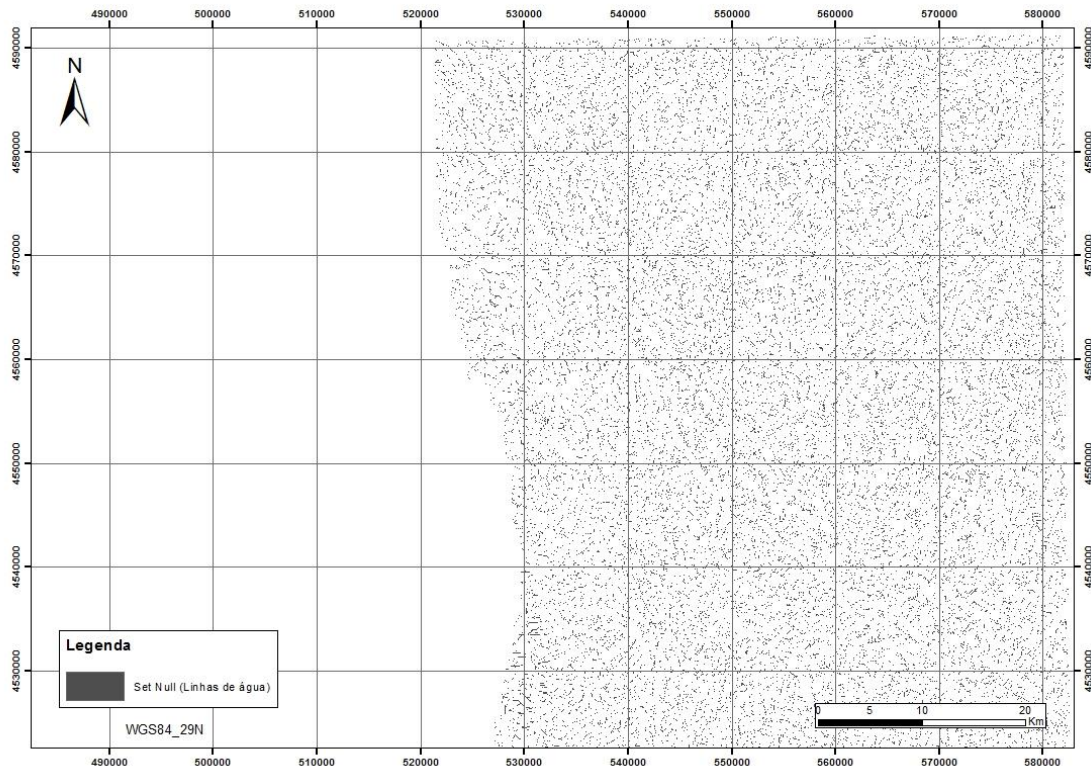


Figura 35 - Linhas de água (Set Null). Datum WGS84\_UTM29N.

O modelo elaborado em cima representa a rede de drenagem da área de estudo. Posteriormente à sua realização, procede-se a correção dos pontos de sedimentos de corrente. Esta correção consiste em colocar cada ponto no seu respetivo local da rede de drenagem, com o auxílio dos mapas da campanha de amostragem de sedimentos de corrente, para obter a melhor exatidão possível.

Após a correção dos pontos, estes foram transformados em *raster* (*Arctoolbox*→*Conversion tools*→*To raster*→*Point to raster*).



Seguidamente, realizam-se as bacias (Figura 36) através do seguinte procedimento: *Arctool box*→*Spatial analyst tools*→*Hydrology*→*Watershed*. Esta ferramenta identifica áreas de captação com bases em locais especificados (sedimentos de corrente).

- i. *Input flow direction raster*: Flow direction;
- ii. *Input raster or feature pour point data*: Sedimentos de corrente / Concentrados de bateia;
- iii. Em *environments*, em *Process extent*, definir como “Same layer as Flow direction”, para não existir desfazamentos no modelo realizado.

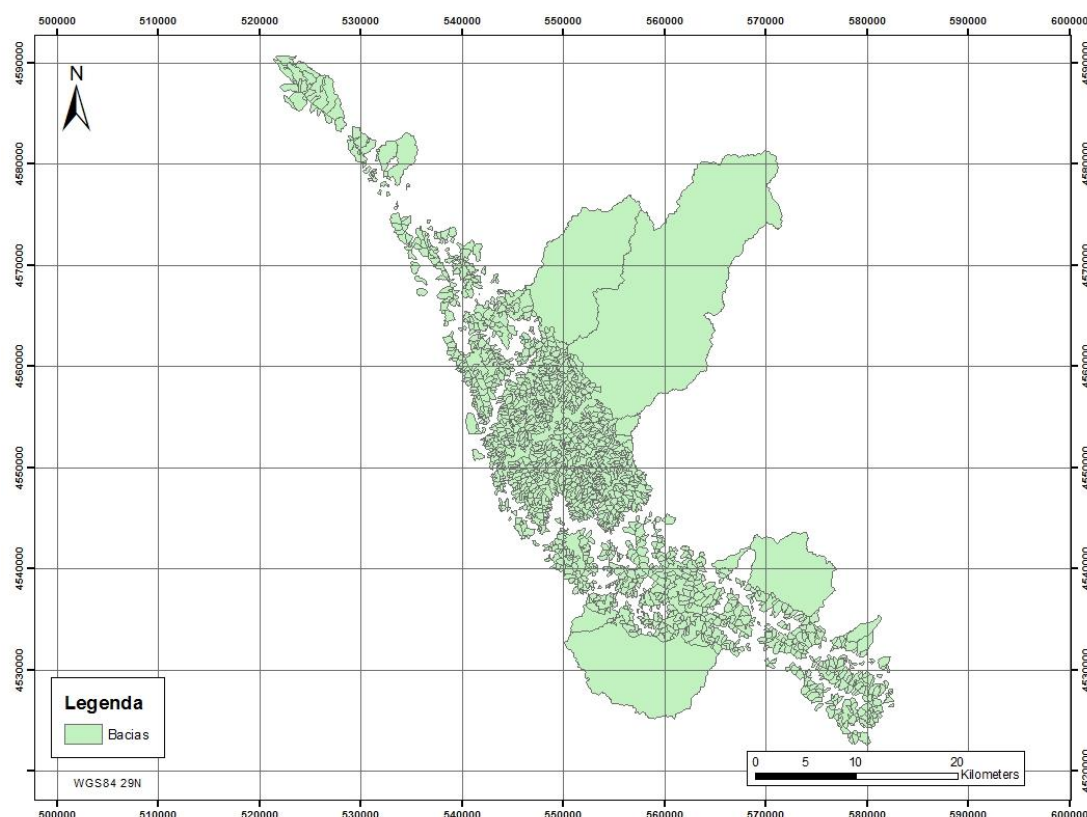


Figura 36 - Bacias em formato vetorial. Datum WGS84\_UTM29N.

Para facilitar o seu uso, as bacias foram convertidas em polígonos (*Arctool box*→*Conversion tools*→*From raster*→*From raster to Polygon*). Posteriormente à sua conversão, as bacias evidenciavam alguns erros, sendo que para a sua resolução usou-se a função *dissolve* (através de um *dissolve* por *Gridcode*, um número associado ao *raster*).

Por fim realizou-se um *Spatial Join*, para reaver a informação dos sedimentos de corrente/concentrados de bateia retirada quando se formaram as bacias (*Arctool box*→*Analysis tools*→*Overlay*→*Spatial Join*). As bacias foram categorizadas por teores



de Sb (Figura 37) e Au (Figura 38). As bacias com área maior ou igual a 4 foram eliminadas, pois nestas a concentração dos minérios encontra-se muito diluída.

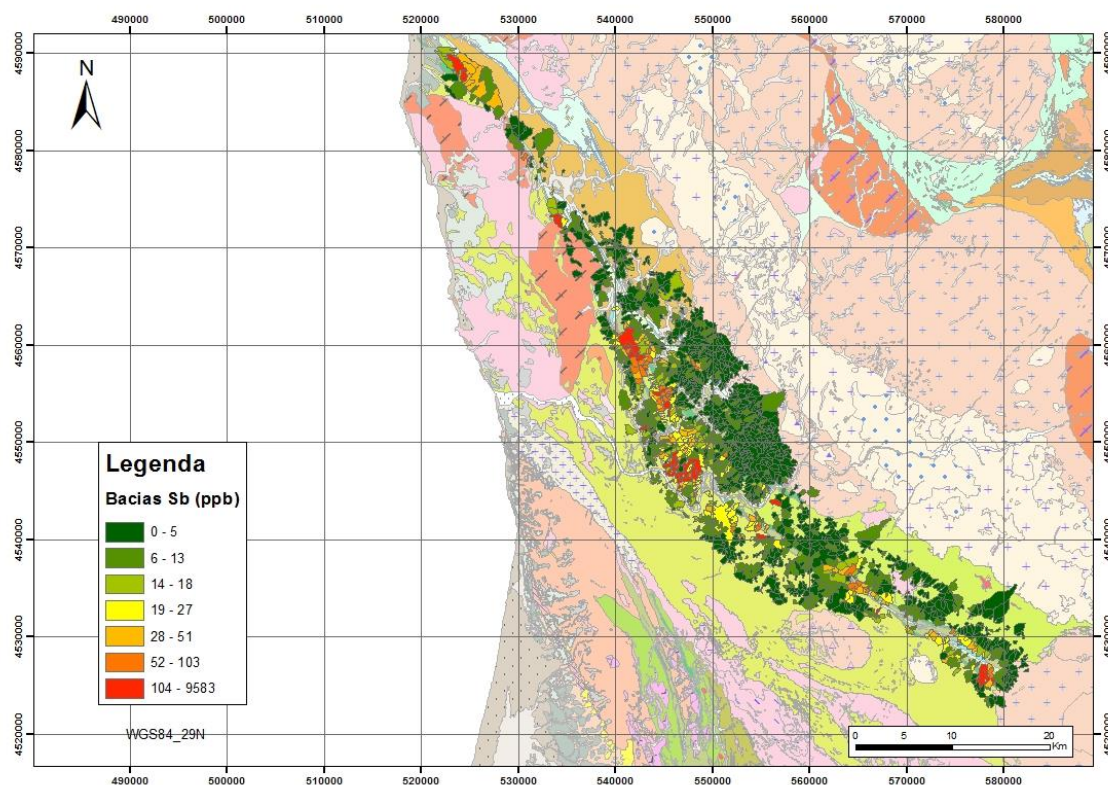


Figura 37 – Bacias em formato vetorial (polígonos) com os teores de antimónio. Datum WGS84\_UTM29N.

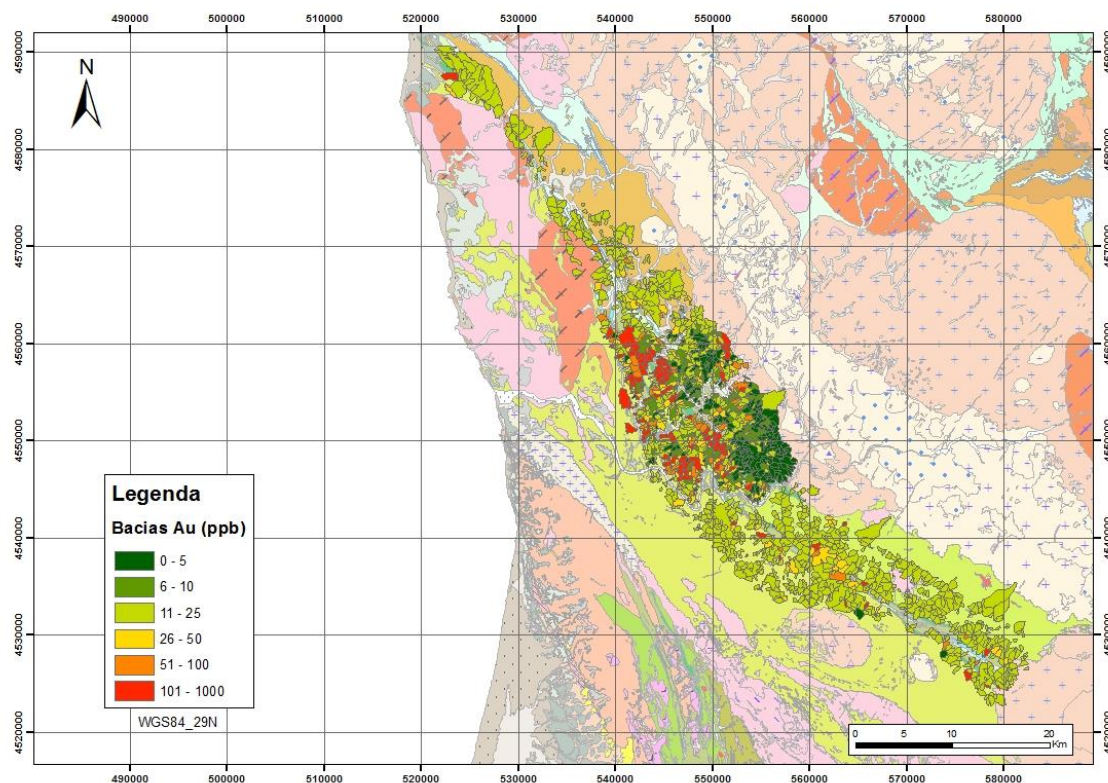


Figura 38 – Bacias em formato vetorial (polígonos) com os teores de ouro. Datum WGS84\_UTM29N.

## 6.3. ANÁLISE ESPACIAL

### 6.3.1. DISTÂNCIA AO VIZINHO MAIS PRÓXIMO (DNN)

A análise de padrão espacial de um conjunto de pontos apresenta várias aplicações nas ciências da Terra e diferentes métodos tem sido propostos para esta análise, incluindo a análise Fry (Fry 1979) e análise fractal (Carranza, 2009a)

Esta é usada para adquirir informação sobre a disposição dos pontos no espaço, podendo deduzir a distribuição espacial das ocorrências de certos geo-objetos representados por pontos (Diggle, 1983; Boots & Getis, 1988).

O padrão de aleatoriedade espacial completo (CSR), o padrão *cluster* e o padrão regular são os três tipos básicos de padrões de distribuição pontos (Figura 39).

No padrão de aleatoriedade espacial completo (*Random*), os pontos apresentam falta de interação entre eles. Este padrão sugere geo-objetos resultantes de processos independentes.

No padrão agrupado (*clustered*), os pontos formam grupos em relação aos pontos do padrão aleatório. Este padrão sugere geo-objetos resultantes de uma ação recíproca dos processos que envolvem a "concentração" de grupos de pontos, em determinados locais.

No padrão regular, os pontos apresentam-se mais distantes em comparação com os pontos de padrão aleatório. Este padrão sugere geo-objetos resultantes de uma ação recíproca dos processos que envolvem a "circulação" de pontos individuais para determinados locais (Carranza, 2009a e b).

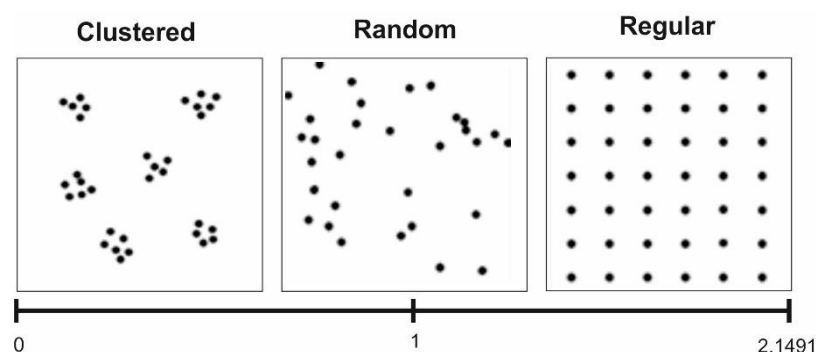


Figura 39 - Tipos básicos de padrões espaciais de conjunto de pontos: aleatoriedade espacial completo, cluster e regular e a razão R. (Adaptado Carranza, 2009b)

Com a finalidade de quantificar e qualificar a distribuição espacial global das ocorrências das minas de antimónio e antimónio-ouro e filões básicos na região Dúrico Beirã, uma abordagem comum é calcular a distância ao vizinho mais próximo (DNN) para cada ponto, método desenvolvido por Evans e Clark (1954).

Este método é usado na obtenção do espaçamento dos objetos de uma população de densidade conhecida e a sua relação espacial. O DNN calcula o índice de vizinho mais próximo, num mapa de duas dimensões, baseando-se na distância de cada objeto ao seu vizinho mais próximo. Este cálculo é dado pela razão  $R$ , com um intervalo de 0 a agregação máxima, onde os objetos ocupam o mesmo local e de 2,1491 para o espaçamento máximo entre objetos distribuídos num mesmo padrão hexagonal.

O valor da razão  $R$  é dado pela fórmula:

$$R = \frac{r_A}{r_E}$$

Onde  $r_A$  é o valor médio de DNN observado e  $r_E$  a distância média do valor de DNN para uma distribuição espacial perfeitamente aleatória (Deveaud *et al.*, 2013).

### **6.3.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DENSIDADE**

A distribuição espacial da densidade, usando a densidade de Kernel, consiste na estimação da intensidade de ocorrências na área de estudo. Uma superfície é gerada e o seu valor é proporcional à intensidade de eventos por unidade de área. Este é maior na localização do ponto e diminui com o aumento da distância a partir do ponto.

Esta função realiza uma interpolação de dados, isto é, proporciona a estimação da intensidade do evento em toda a área, mesmo nos locais que não apresentam dados.

A densidade de Kernel está dependente de dois critérios, o raio de influência ( $t$ ) e a função  $K$ . O raio de influência define a vizinhança do ponto a ser interpolado e controla o grau de alisamento da superfície. As funções de interpolação  $K$  diferem no modo de atribuição de pesos aos pontos dentro do raio  $t$ , que serão utilizados para estimar a intensidade na área (Carneiro & Santos, 2003; Documentos da unidade curricular Introdução à Estatística Espacial)

### 6.3.3. MÉTODO DE DISTRIBUIÇÃO DA DISTÂNCIA

O método de distribuição da distância caracteriza a associação espacial entre dois conjuntos de objetos. A associação espacial expressa a distância ou gama de distâncias em que objetos indicam uma localização favorável de outros objetos (Wibowo, 2006; Ibrahim & Bennett, 2014).

Segundo Carranza (2002), a distância de associação espacial ótima representa a maior diferença entre as duas curvas, pois a força de associação espacial é inversamente proporcional à distância dos objetos.

Este método inicia-se com a introdução de uma malha de pontos distribuídos uniformemente sobre a área de estudo (Malha 30x30) e é calculada a distância euclidiana entre cada ponto deste conjunto e o ponto mais próximo de determinada característica geológica. O histograma resultante (Figura 40) corresponde à distribuição de frequência de distância de uma determinada característica geológica (falhas, filões, minas, entre outras) num local do mapa, definindo a distribuição de referência (barras cinzentas do histograma da Figura 40). De modo a estudar a relação de duas ou mais características geológicas diferentes, é necessário calcular a distância entre cada ponto de uma determinada característica e o seu ponto mais próximo de outra característica, definindo-se a frequência relativa de pixéis em cada classe de distância tanto na distribuição de referência como na anterior (Carranza, 2011).

A distribuição das características geológicas (Filões básicos e minas de antimónio e antimónio-ouro) é comparada a um conjunto de pontos uniformemente distribuídos dentro da mesma área seguindo o método aplicado pelo Deveaud *et al.* (2013).

Estes pontos invariavelmente distribuídos são chamados pontos de referência. A comparação entre a distribuição de frequência de características geológicas e os de referência permite perceber a distribuição de frequência.

Nesta técnica pode-se definir diferentes distribuições de frequência, a distribuição normal, a distribuição baixa anormal e a distribuição alta anormal.

A distribuição normal (ND) é observada quando os valores de frequência são semelhantes ou menores que a distribuição de referência. A relação entre os valores de distribuição de referência e a distribuição de determinadas características geológicas (minas de Sb e Sb-Au, filões básicos, entre outras), apresentam uma razão de distribuição menor que 1,2.

Na distribuição baixa anormal (LAD) a proporção apresenta-se dentro do seguinte intervalo [1,2; 1,5[.

A distribuição alta anormal (HAD) é observada quando o valor de frequência de características geológicas aumenta à medida que a frequência de distribuição de referência diminui e a relação entre estas é maior ou igual que 1,5 (Deveaud *et al.*, 2013).

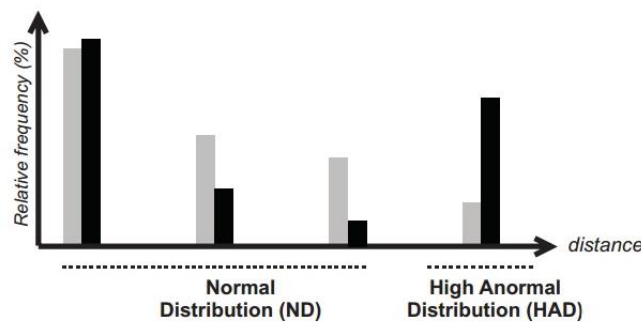


Figura 40 - Histograma com as diferentes distribuições de referências, Distribuição Normal (ND) e Distribuição Alta Anormal (HAD) (Deveaud *et al.*, 2013).





# CAPÍTULO 7

## RESULTADOS

### 7.1 ANÁLISE MAGNÉTICA

#### 7.1.1 SUSCETIBILÍMETRO

#### 7.1.2 MAGNETÓMETRO

### 7.2 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL

#### 7.2.1 DISTÂNCIA AO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

#### 7.2.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DENSIDADE

#### 7.2.3 MÉTODO DE DISTRIBUIÇÃO DA DISTÂNCIA

## 7. RESULTADOS

### 7.1 ANÁLISE MAGNÉTICA

#### 7.1.1 SUSCETIBILÍMETRO

A recolha de valores de suscetibilidade magnética (K) no campo, com o auxílio de um suscetibilímetro portátil, possibilitou criar gráficos com a variação deste parâmetro ao longo dos afloramentos. Após o cálculo dos valores médios de suscetibilidade magnética (registados na tabela no Anexo 1) medidos em cada litologia, procedeu-se à projeção destes num gráfico X (Pontos de GPS) e Y (Suscetibilidade Magnética ( $\times 10^{-6}$  SI)). As figuras 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 representam as medições realizados nos afloramentos.

Cada ponto do gráfico exibe a média de oito medidas efetuadas em cada local no campo. As cores patenteiam as litologias onde foi medida a suscetibilidade magnética.

Através destes gráficos é possível verificar que os valores mais elevados de suscetibilidade correspondem aos filões básicos (doleritos e diabases) e compreendem os seguintes valores:  $298,88 \times 10^{-6}$  SI (Filão 3) e  $1658,75 \times 10^{-6}$  SI (Filão 7b).

Segundo o que foi referido anteriormente neste mesmo capítulo, quando as rochas apresentam uma suscetibilidade magnética superior a  $1000 \times 10^{-6}$  SI contêm magnetite, caso contrário, se esta for inferior a  $1000 \times 10^{-6}$  SI não possuem magnetite. De todos os filões estudados, apenas um contém magnetite, o Filão 7b, com um K de  $1658,75 \times 10^{-6}$  SI; os restantes não incluem magnetite.

As rochas encaixantes (metassedimentos, quartzitos e conglomerados) apresentam valores inferiores, entre  $42,00 \times 10^{-6}$  SI e  $460,50 \times 10^{-6}$  SI, apresentando os conglomerados os valores mais baixos de suscetibilidade magnética.

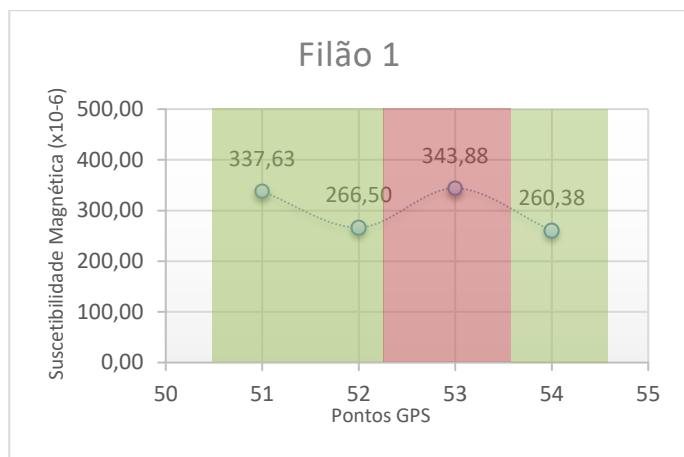


Figura 41 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 1.

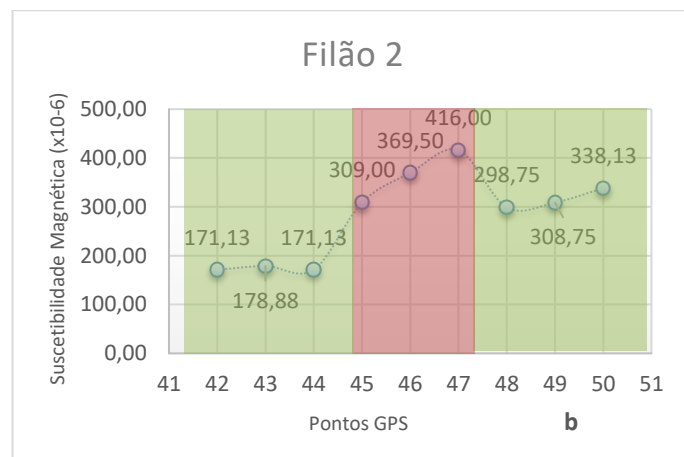


Figura 42 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 2.

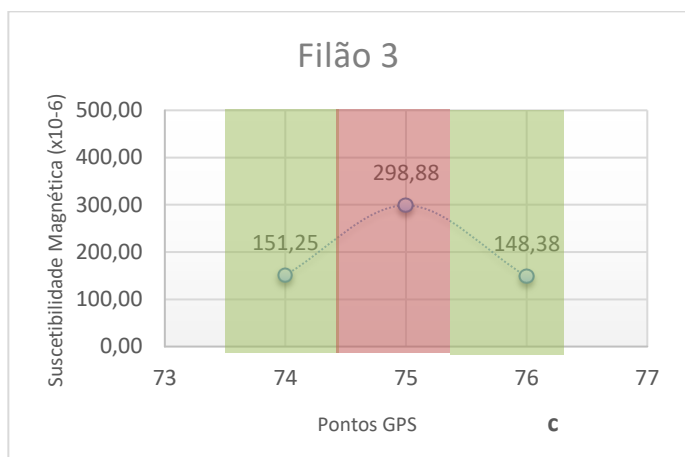


Figura 43 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 3.

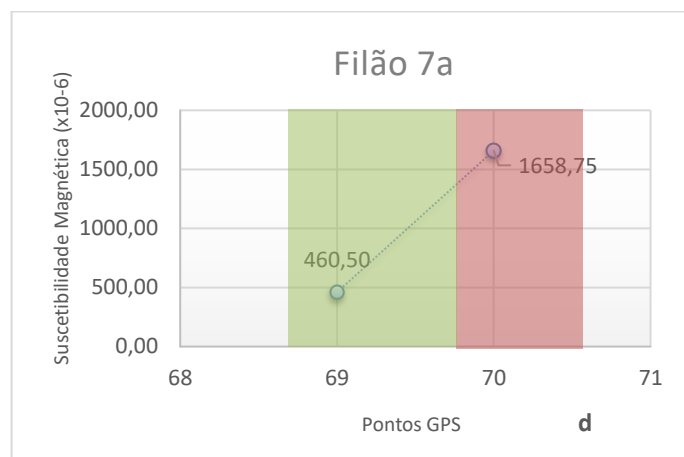


Figura 44 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 7a.

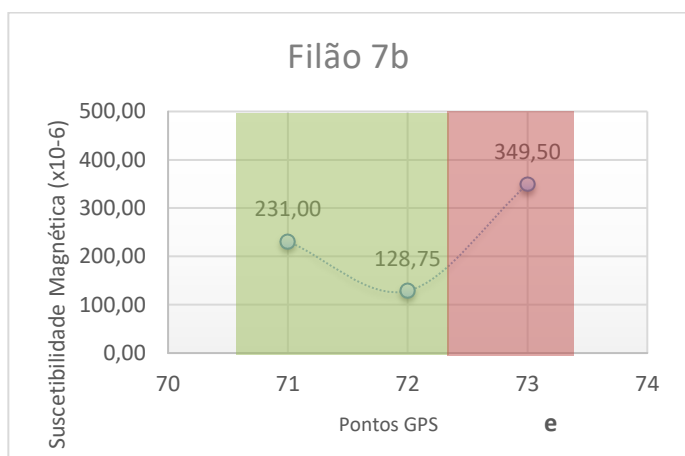


Figura 45 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 7b.

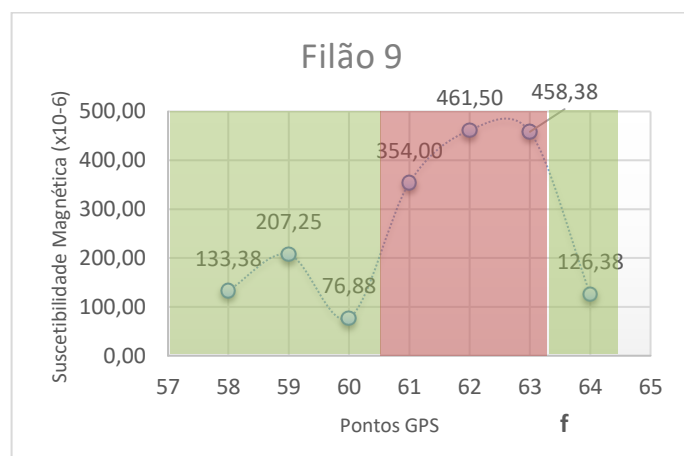


Figura 46 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 9.

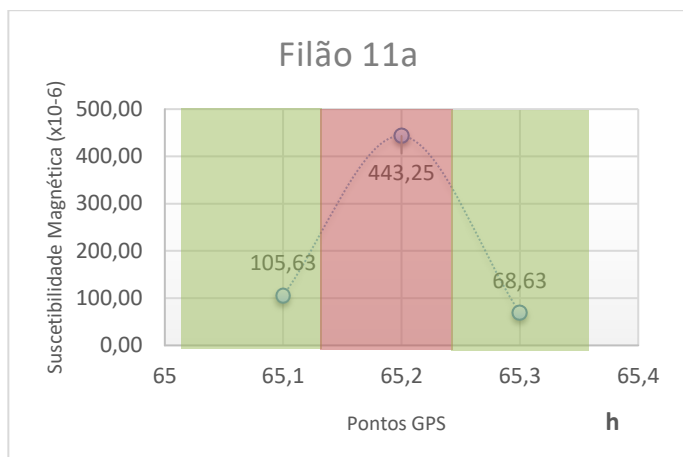


Figura 47 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 11a.

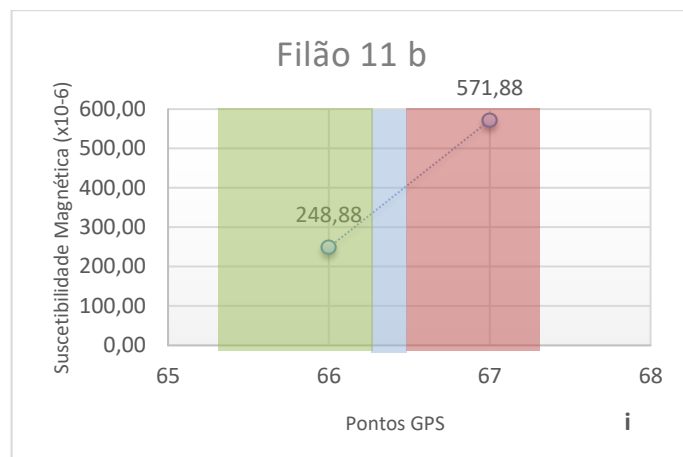


Figura 48 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 11b.

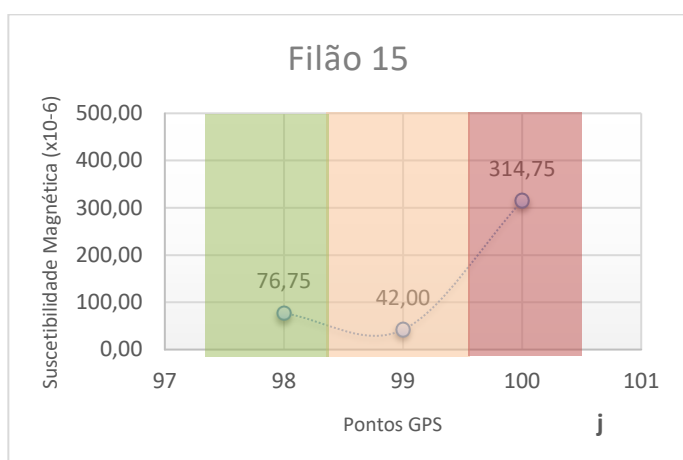


Figura 49 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 15.

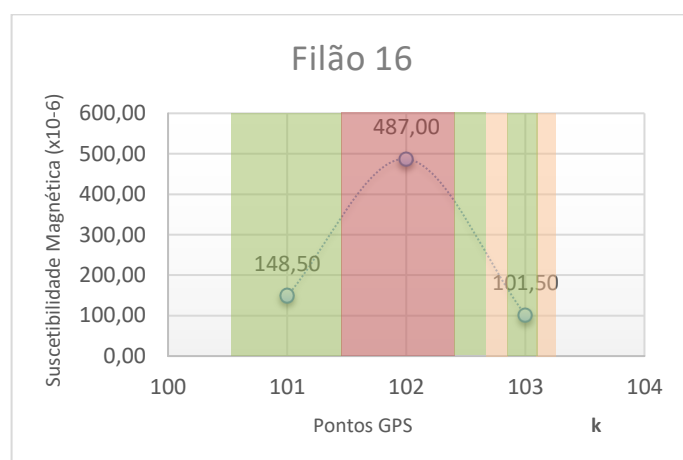


Figura 50 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 16.

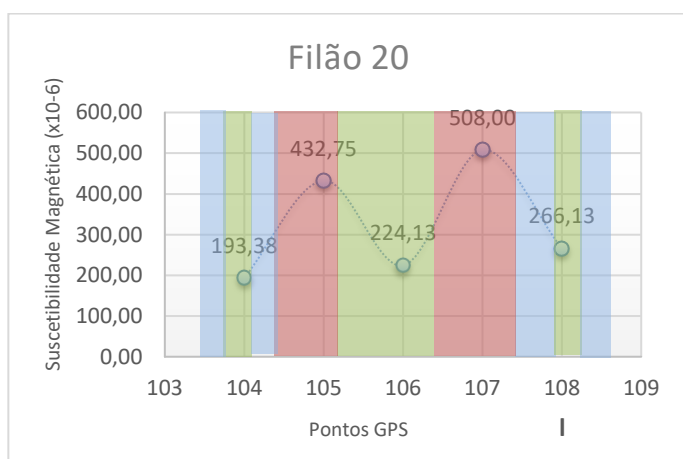
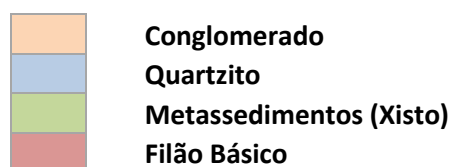


Figura 51 - Medições de suscetibilidade magnética (média de 10 pontos) em cada ponto GPS no afloramento do filão 20.

#### Legenda:



## 7.1.2 MAGNETÓMETRO

O processamento dos dados foi realizado no ArcGis, no sistema de coordenadas UTM WGS84, fuso 29N. Os dados foram categorizados em classes, variando dos tons

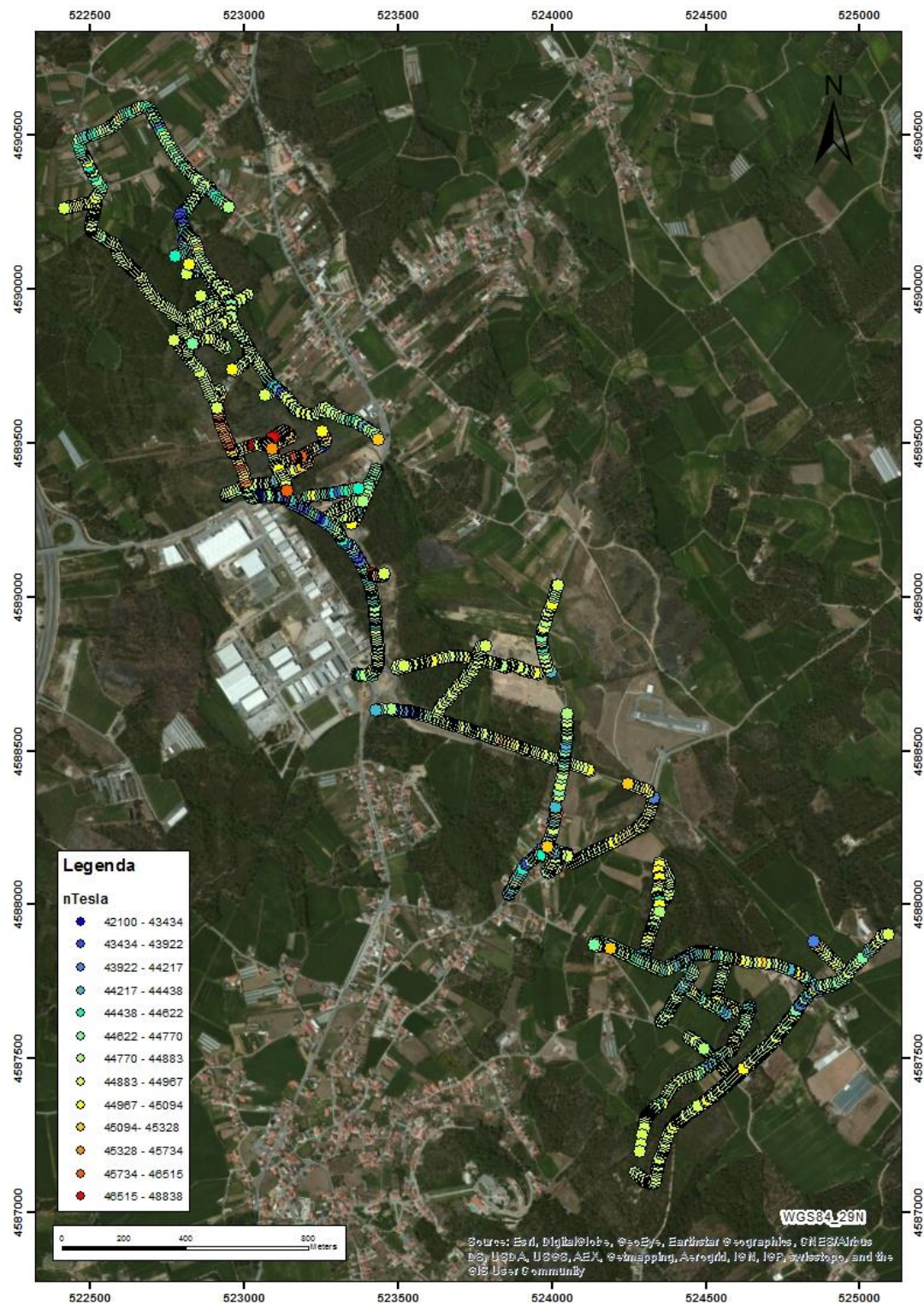


Figura 52 – Projeção de todas a medidas de campo magnético efetuadas na parte norte da área de estudo, Lagoa Negra-Rates.



vermelhos que apresentam valores da intensidade do campo magnético mais altos a tons azuis com valores mais baixos (Figura 52).

Para uma melhor compreensão e observação dos dados obtidos foi realizada um método de interpolação, nomeadamente, *Kriging*. Este método de interpolação foi realizado, posteriormente, à remoção de ruídos, tanto na zona norte, Lagoa Negra como na parte mais a sul, em Rates (Figura 53).

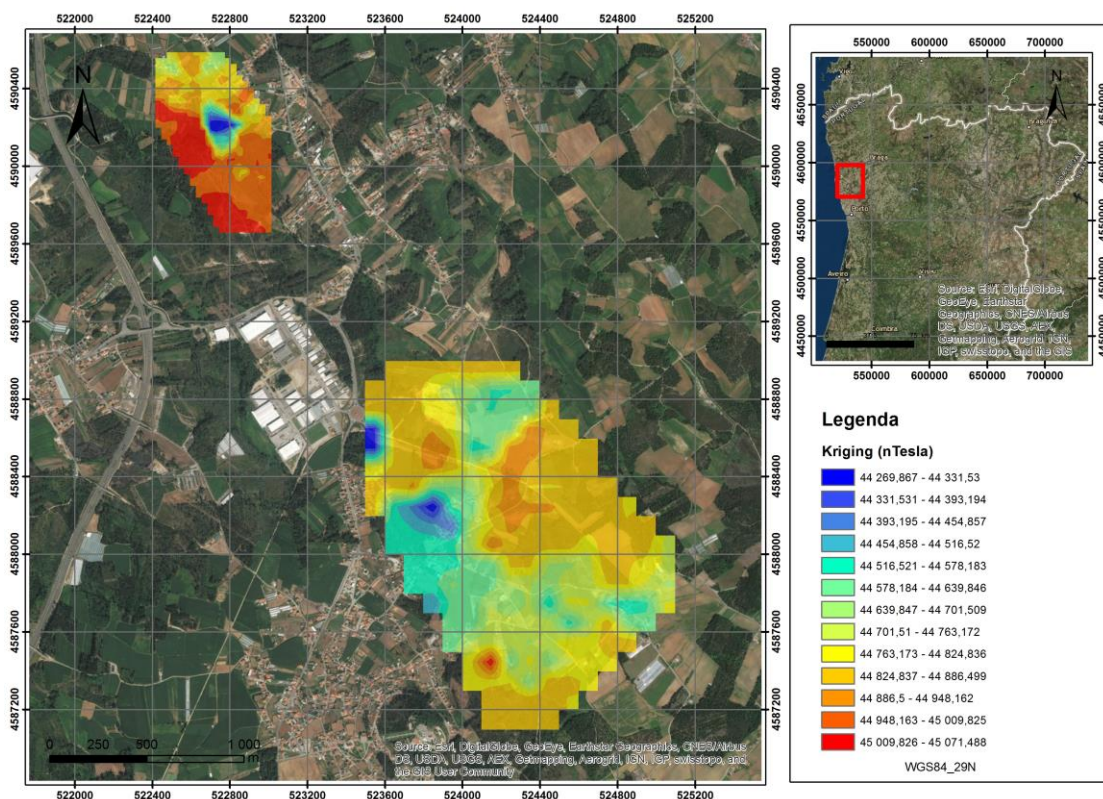


Figura 53 – Mapa de interpolação de dados, *kriging*, realizado depois da remoção de ruídos.

Foram traçadas 2 retas ao longo de perfis SW-NE, assinalados no mapa (Figura 54), unindo as extremidades das anomalias magnéticas (anomalia positiva e anomalia negativa).

Através dos perfis longitudinais é possível observar pelo menos duas prováveis anomalias magnéticas, constituída por máximos (valores elevados) e mínimos (valores baixos).

O perfil 1, inicialmente, mostra um aumento do campo magnético até aos 150 metros (>44900 nT) e de seguida um decréscimo entre os 200 e os 350 m (<44000 nT), materializando uma anomalia magnética, constituindo um alinhamento NW-SE(N160°).

O perfil 2 começa a aumentar aos 100m (>44850 nT) e aos 300 m ocorre, um decréscimo, com valores de campo magnético inferiores a 44600 nT. Neste perfil é

possível observar uma anomalia que constitui um alinhamento coincidente com o anterior, NW-SE, podendo materializar o mesmo alinhamento.

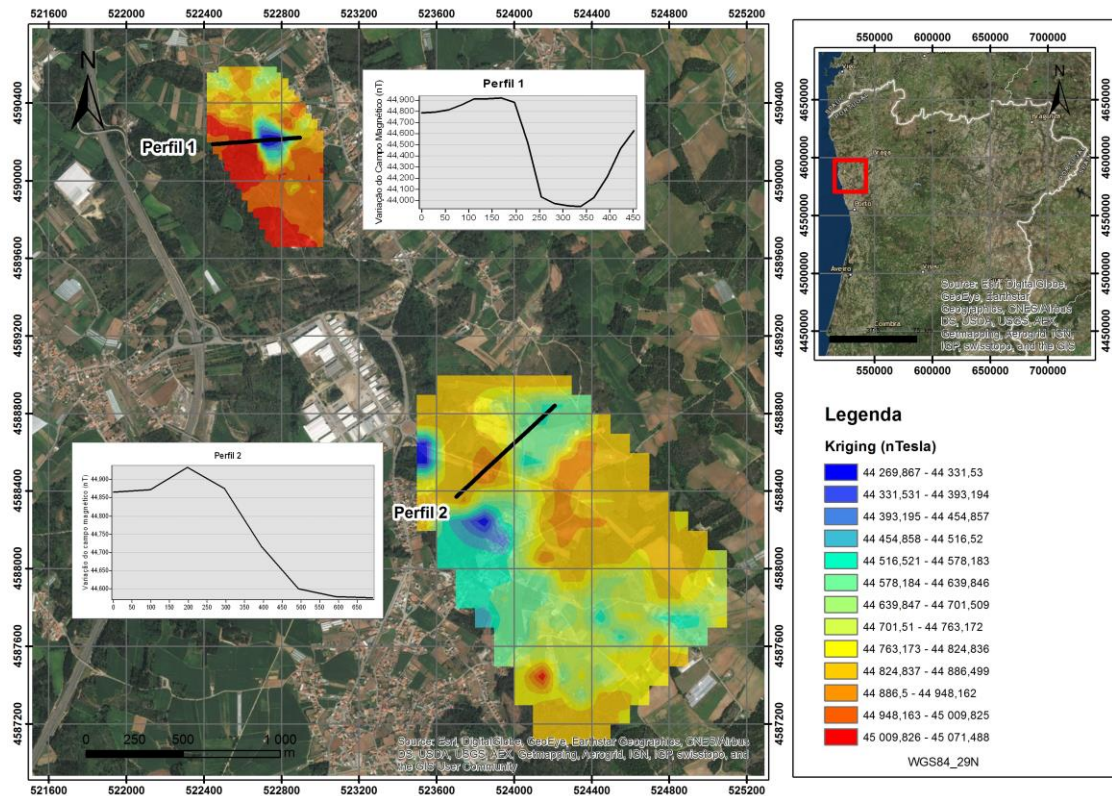


Figura 54 - Mapa com o *kriging* projetado e os perfis 1,2, cortando as anomalias e os respetivos gráficos.



Através do método de interpolação, *Kriging*, e dos perfis efetuados evidencia-se um alinhamento principal de orientação, NW-SE, aproximadamente N160° (Figura 55 e Figura 56). Os alinhamentos podem ser consequência de corpos magnéticos que criam anomalias positivas e anomalias negativas.

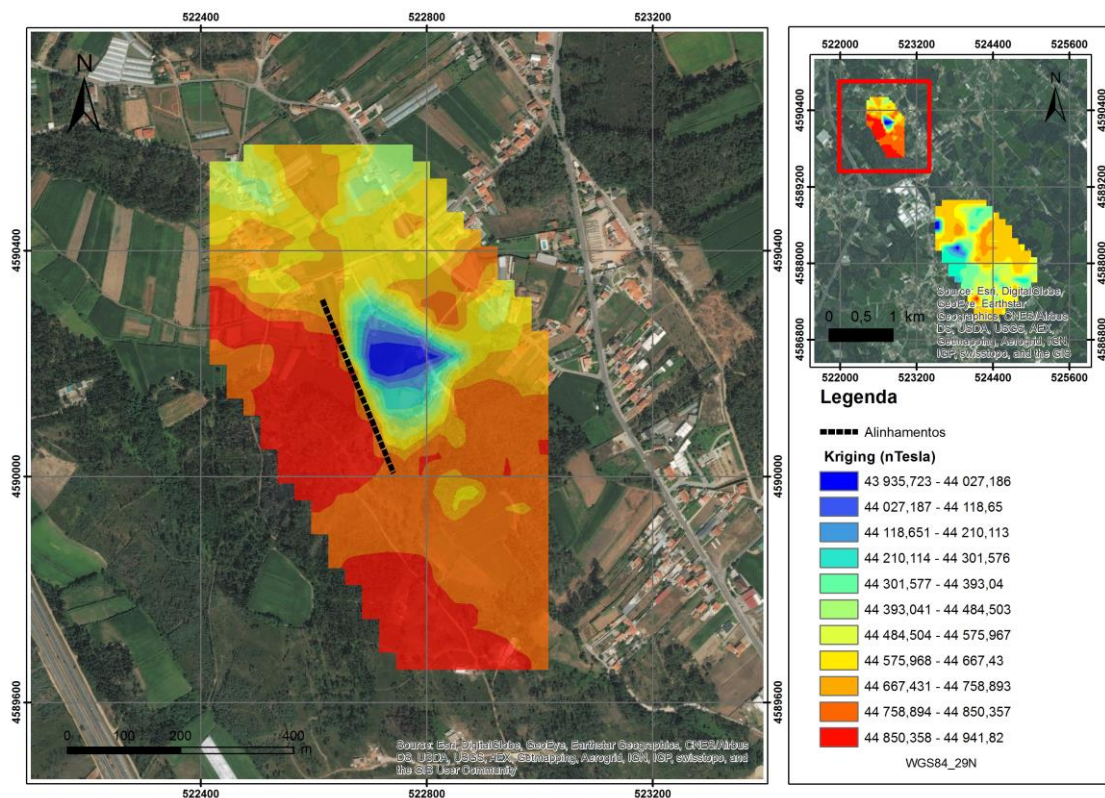


Figura 55 – Mapa com o kriging projetado da parte norte da área (Lagoa Negra) evidenciando um alinhamento N160°.



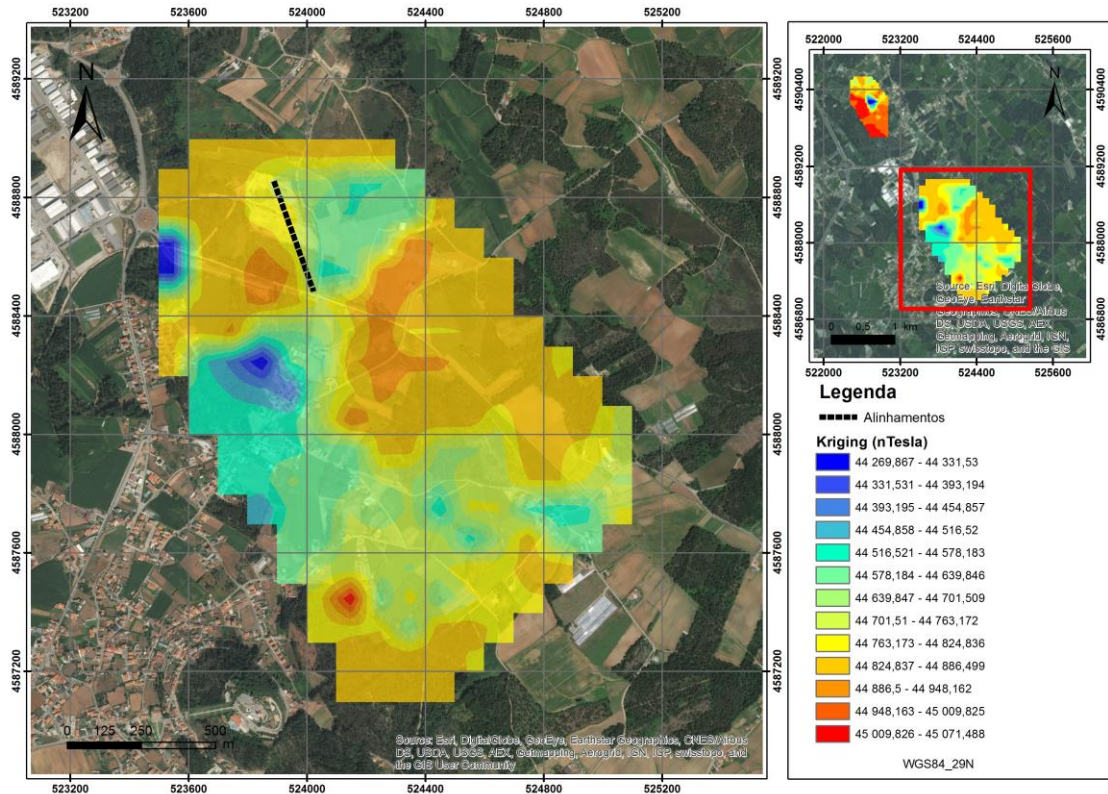


Figura 56 – Mapa com o kriging projetado da parte sul da área (Rates) evidenciando um alinhamento N160°.

O alinhamento apresenta uma orientação N160° coincidindo com uma estrutura inferida por Leal *et al.*, 2016 (Figura 57) por métodos de geofísica, nomeadamente por VLF e resistividade, tendo sido identificada uma estrutura regional que se considera estar associada com a mineralização de ouro e antimónio.

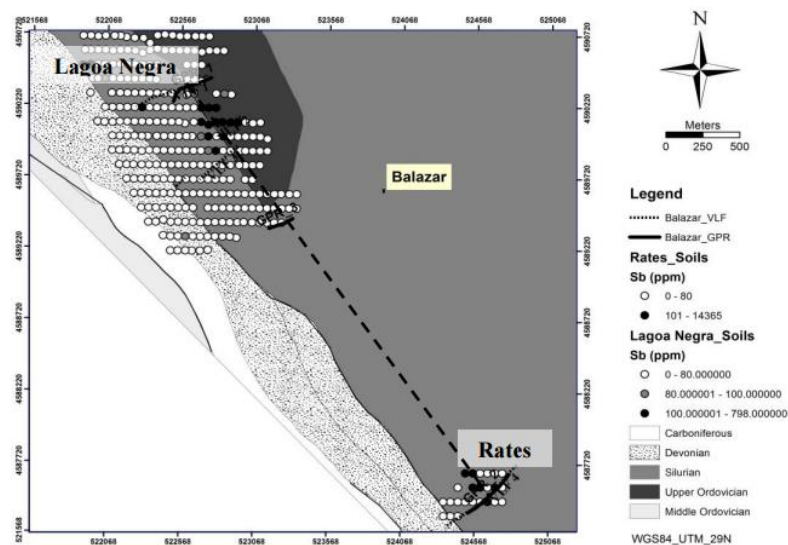


Figura 57 – Mapa dos resultados de VLF, Resistividade e Campanha de solos e direção da estrutura possível inferida (Leal *et al.*, 2016).

## 7.2 ANÁLISE ESPACIAL

### 7.2.1 DISTÂNCIA AO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Na área de estudo ocorrem 50 filões básicos e a análise da distribuição de frequência de DNN (Figura 58) indicou que a distância média ao vizinho mais próximo obtida foi de 997,6, com uma distância mínima de 44,4 e uma máxima de 10175,4 m.

A distância média ao vizinho mais próximo observada (997,6) é bem menor que o valor esperado (1690,8). A razão R, razão do vizinho mais próximo, é aproximadamente 0,59, que comprova o elevado agrupamento das ocorrências dos filões básicos.

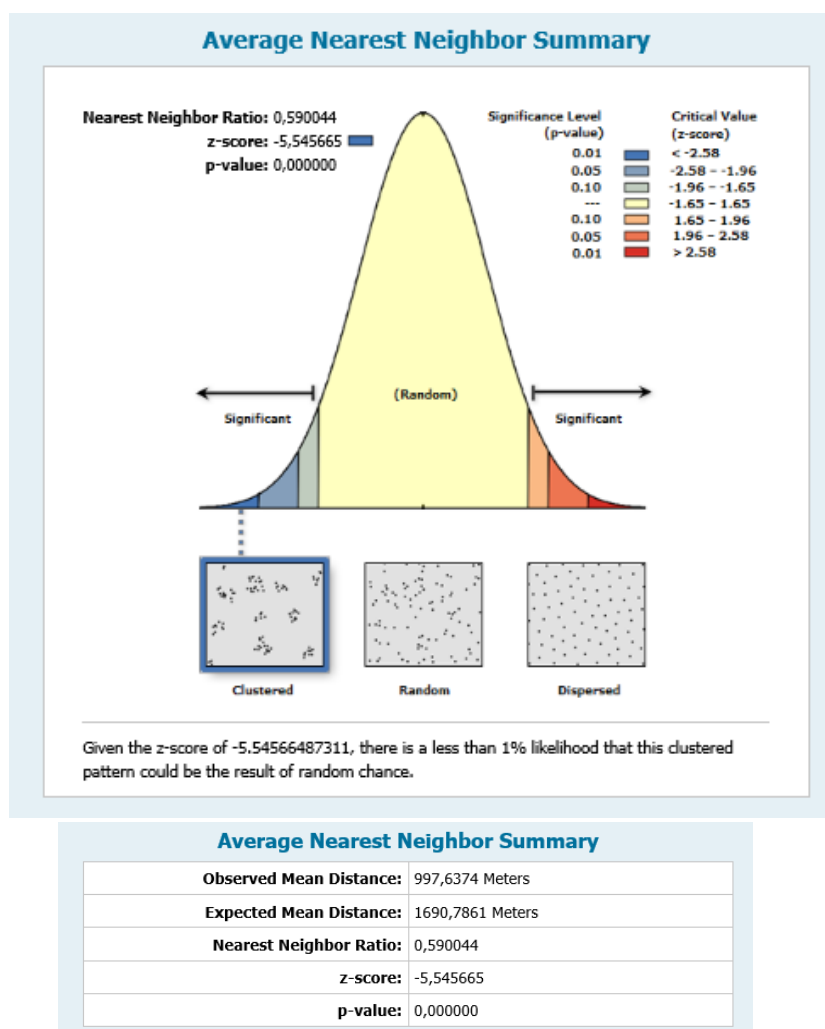
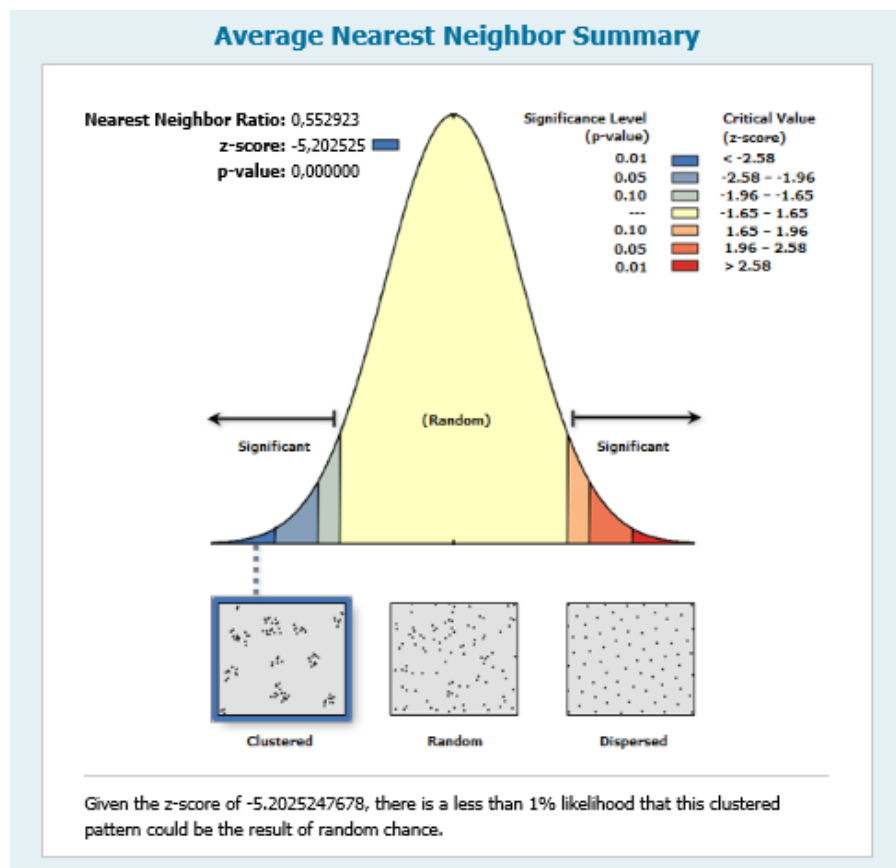


Figura 58 – Sumário da distância média ao vizinho mais próximo dos filões básicos

O mesmo estudo foi realizado para as minas de antimónio e antimónio-ouro, tendo sido a distância média ao vizinho mais próximo de 1394,3 m, com uma distância mínima de 145,4 m e uma distância máxima de 22807,3 m (Figura 59).

A distância média ao vizinho mais próximo observada (1394,3) é inferior ao valor esperado (2521,7). A razão R é mais precisamente 0,55, o que comprova o elevado agrupamento das ocorrências das minas de Sb e Sb-Au.



**Average Nearest Neighbor Summary**

<b>Observed Mean Distance:</b>	1394,3163 Meters
<b>Expected Mean Distance:</b>	2521,7191 Meters
<b>Nearest Neighbor Ratio:</b>	0,552923
<b>z-score:</b>	-5,202525
<b>p-value:</b>	0,000000

Figura 59 - Sumário da distância média ao vizinho mais próximo das minas de Sb e Sb-Au.

### 7.2.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DENSIDADE

A distribuição espacial da densidade das minas de antimónio e antimónio-ouro (Figura 60), consiste na estimação da intensidade das minas por unidade de área. É possível verificar a existência de duas famílias, dois aglomerados, um com o máximo de 0,45 a 0,5 minas por km<sup>2</sup> e outro com 0,35 a 0,4 por km<sup>2</sup>.

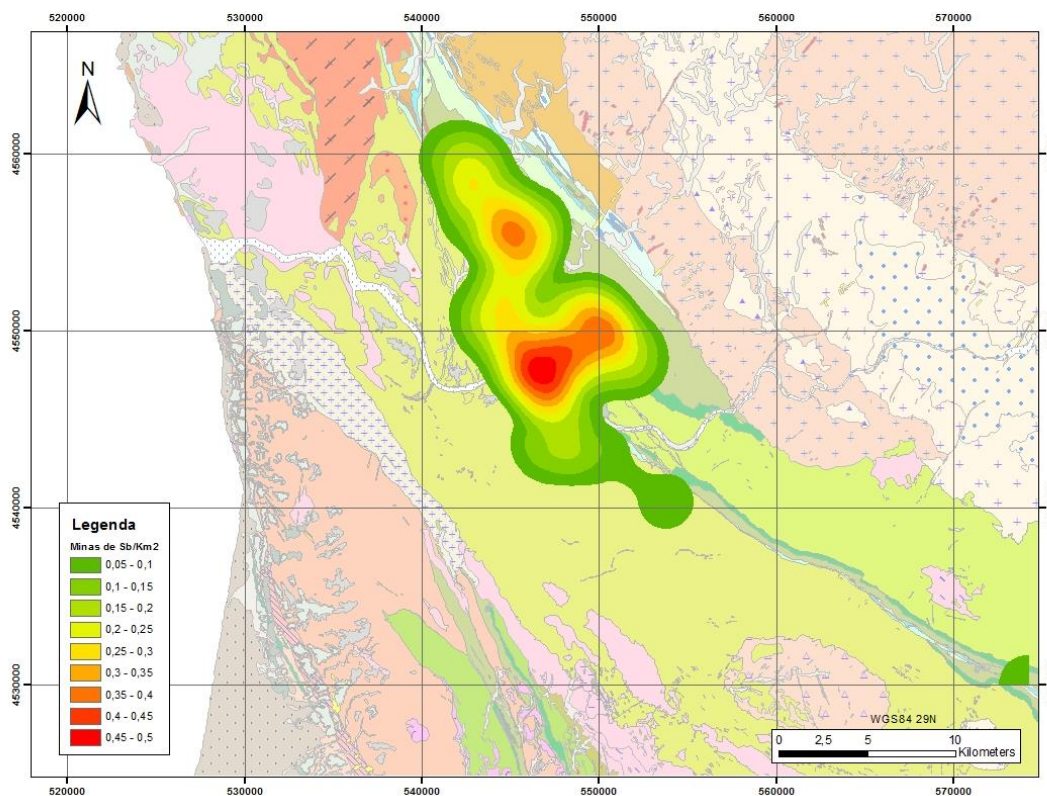


Figura 60 - Mapa de densidade das minas de Sb e Sb-Au (minas por quilómetro quadrado) na área de estudo.



O mesmo estudo foi realizado nos filões básicos (Figura 61), onde foi possível constatar a existência de duas famílias, duas fortes acumulações, uma com o máximo de 2 a 2,2 minas por km<sup>2</sup> e outra com 1 a 1,2 por km<sup>2</sup>.

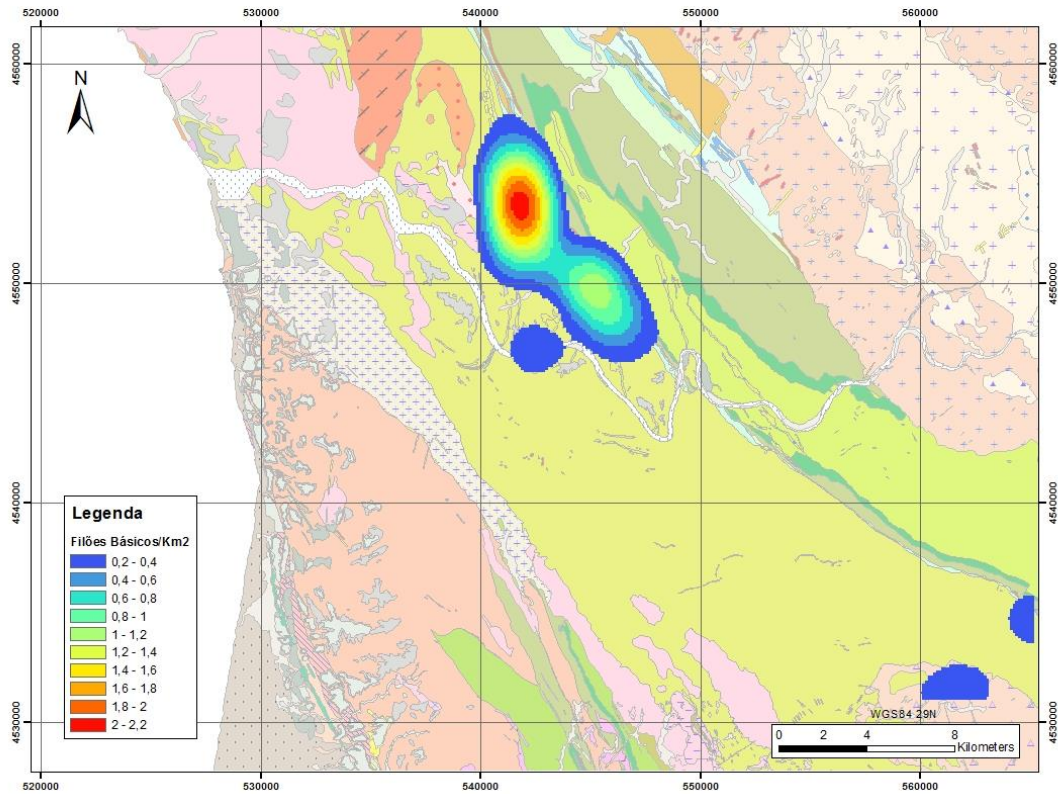


Figura 61 - Mapa de densidade dos filões básicos (filões por km<sup>2</sup>) na área de estudo.

## 7.2.3 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DISTÂNCIA

### 7.2.3.1 ANÁLISE DE DISTÂNCIA ENTRE AS MINAS DE ANTIMÓNIO E ANTIMÓNIO-OURO E OS FILÕES BÁSICOS

A distribuição espacial das minas de antimónio e antimónio-ouro está compreendida entre 0-29956 m, ao passo que a distribuição dos pontos de referência estende-se entre 0-28844 m. As minas de antimónio e antimónio-ouro encontram-se a uma distância média de 5463 m dos filões básicos (Figura 62).

As primeiras quatro classes de distância, entre [0,300[ a [750,1000[ mostram que a distribuição das minas é superior à distribuição de referência, representando 33% das minas da sua totalidade, com uma razão de distribuição compreendida entre 6,9 e 17,15. A faixa de distância de [3250,3500[ a [3750,4000[ e [4250,4500[ são também do tipo HAD, sendo 30% das minas, com a uma razão de distribuição entre 1,6 e 4,2.

Portanto, 63% das minas de antimónio e antimónio-ouro apresentam uma distribuição anormal alta, ou seja, a razão distribuição das minas é superior a 1,5.

A distribuição das minas de antimónio e antimónio-ouro do tipo LAD encontram-se presentes nas classes [1250,1500 m [, [4500,4750[, [9750,10000[, representando 9% das minas, com uma razão de distribuição, de aproximadamente 1,4.

A partir dos 5000 m, todas as minas apresentam valores de frequência menores que os pontos de referência, exceto a classe [9750,10000 [ já mencionada acima.

Especificamente, cerca de 33% das minas de Sb e Sb-Au apresentam razão de distribuição compreendida entre 6,9 e 17,15, a uma distância inferior a 1000 m dos filões básicos, estando relacionados espacialmente.

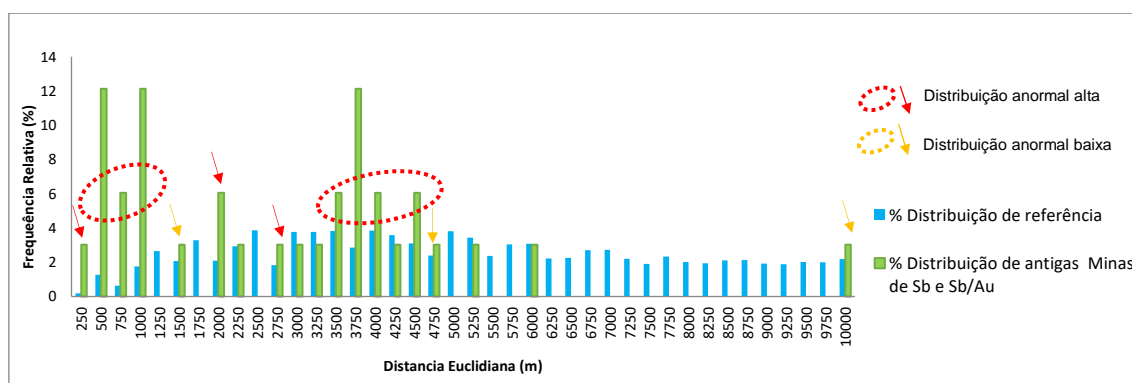


Figura 62 - Histograma representando a análise da distância das minas de Sb e Sb-Au e os filões básicos.

As bacias anômalas em antimônio têm uma extensão espacial entre 0 e 28631 m, e a distribuição de referência de 0 a 28844 m. A distância média das bacias aos filões básicos é de 2169 m (Figura 63).

Por esse motivo, 71% das bacias anómalas em Sb apresentam uma distribuição anormal alta.

Além dos 3500 m, todas as bacias anómalas exibem uma distribuição normal, ou seja, a distribuição de referência é superior à distribuição das bacias.

Em particular, aproximadamente 28% das bacias encontram-se a menos 1000 m dos filões básicos, com uma razão de distribuição compreendida entre 2,6 e 13, estando relacionados espacialmente.



A distribuição das bacias anómalas e das antigas minas de Sb e Sb-Au demonstram distribuições que deviam ser idênticas, pois as anomalias de antimónio das bacias, advém, maioritariamente, de antigas explorações e minas de antimónio. Contudo, comparando a sua distribuição, é possível apurar que existem áreas (marcadas a preto na Figura 64) onde estas não são coincidentes.

A possível razão é a existência de anomalias de Sb que ainda não se encontram descobertas, ou seja, novos recursos e reservas de antimónio ainda por explorar. Por

isso, esta metodologia de análise poderá ser importante na prospeção de novos recursos.

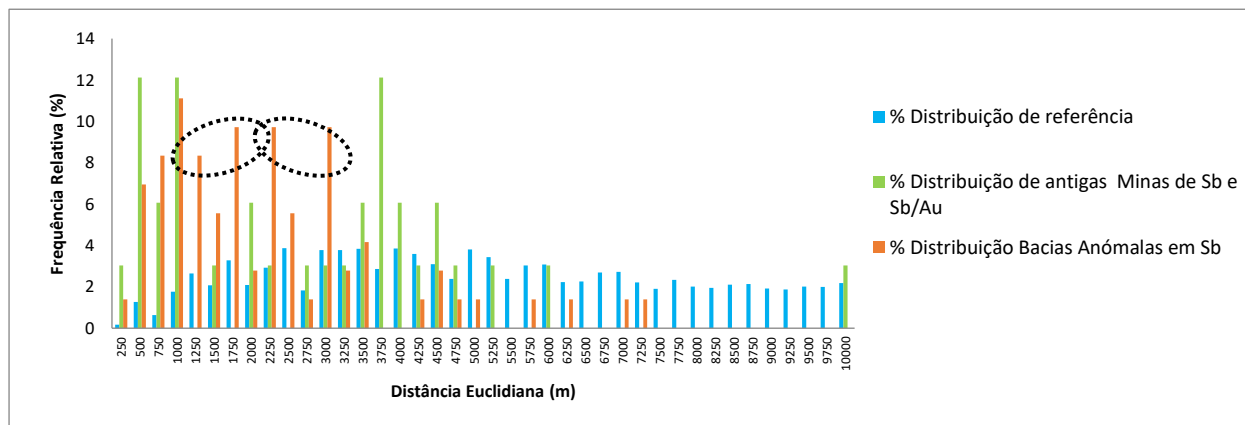


Figura 64 - Histograma representando a análise da distância das minas de Sb e Sb-Au, bacias anómalas em Sb e os filões básicos.



### 7.2.3.3 ANÁLISE DE DISTÂNCIA ENTRE AS MINAS DE ANTIMÓNIO E ANTIMÓNIO-OURO E FALHAS

A distribuição espacial das minas de antimónio e antimónio-ouro está compreendida entre 0-2764 m, ao passo que a distribuição dos pontos de referência estende-se entre 0-11703 m. As minas de antimónio e antimónio-ouro encontram-se a uma distancia média de 1029 m de falhas (Figura 65).

As classes [0,250[; [1000,1250[; [2500,2750[; [3750,4000[ mostram que a distribuição das minas é superior à distribuição de referência, representando 39% das minas da sua totalidade, com uma razão de distribuição compreendida entre 1,6 e 3,3. A faixa de distância de [250, 500[ a [2250,2500[ são do tipo LAD, representando 24% das minas, com uma razão de distribuição, de aproximadamente 1,2.

A partir dos 4000 m, todas as minas apresentam valores de frequência menores que os pontos de referência.

Particularmente, 11% das minas de antimónio e antimónio-ouro encontram-se a menos de 250 m das falhas com uma razão de distribuição de 3,3 e 22% das minas localizam-se entre 1000 e 1250 m das falhas, com uma razão de distribuição de 1,8 estando espacialmente associados.

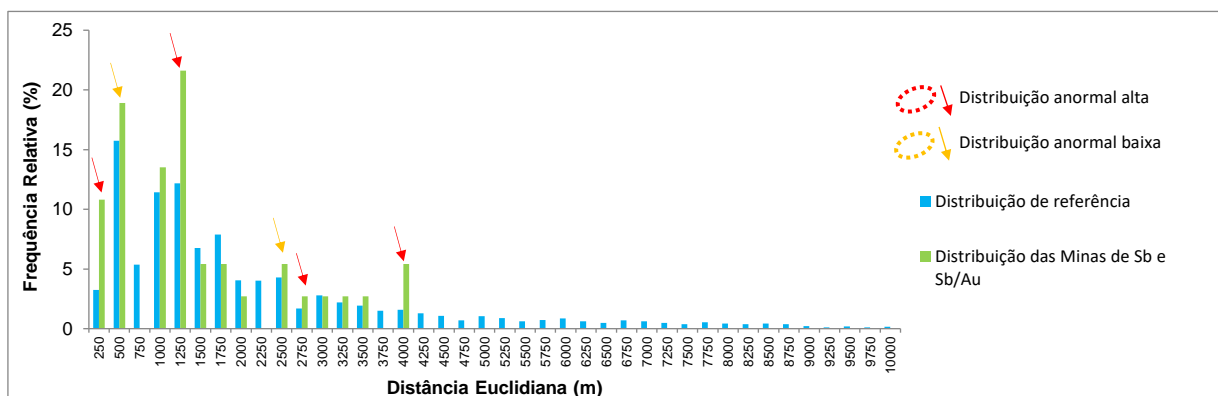


Figura 65 - Histograma representando a análise da distância das minas de Sb e Sb-Au e as falhas.

### 7.2.3.4 ANÁLISE DE DISTÂNCIA ENTRE OS FILÕES BÁSICOS E FALHAS

A distribuição espacial dos filões básicos está compreendida entre 0-4613 m, ao passo que a distribuição dos pontos de referência estende-se entre 0-11703 m. Os filões básicos apresentam-se a uma distancia média de 1304 m de falhas (Figura 66).

O histograma mostra que apenas a classe [250,500[ do tipo LAD, representando 20% dos filões básicos, com uma razão de distribuição de 1,26.

As classes [0,250[; [1250,1500[; [1500,1750[ mostram que a distribuição dos filões é superior à distribuição de referência, representando 46% dos filões na sua totalidade, com uma razão de distribuição compreendida entre 1,9 e 3.

A partir dos 4750 m, todos os filões mostram valores de frequência menores que os pontos de referência.

Discriminadamente, 6% dos filões encontram-se abaixo de 250 m das falhas e 38% dos filões situam-se entre 1250 e 1750 m das falhas.

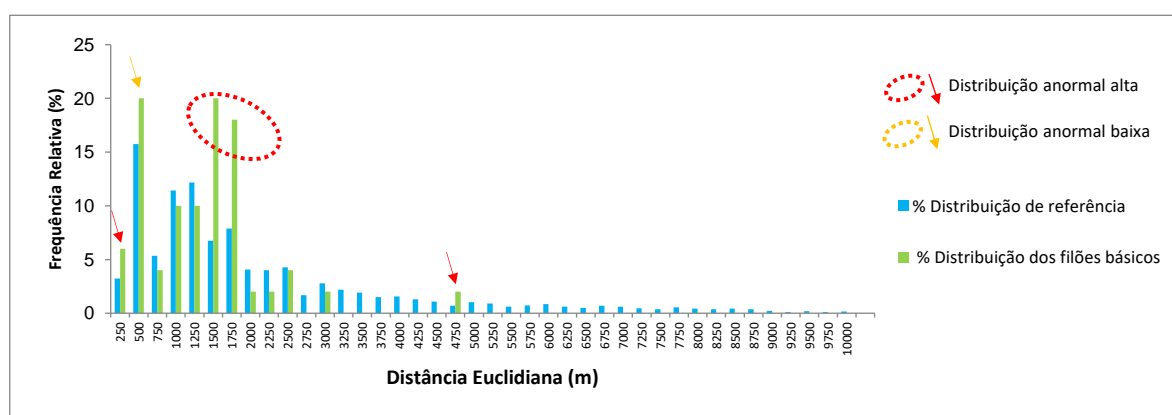


Figura 66 - Histograma representando a análise da distância dos filões básicos e as falhas.

### 7.2.3.5 ANÁLISE DE DISTÂNCIA ENTRE AS MINAS DE ANTIMÓNIO E ANTIMÓNIO-OURO E FILÕES DE QUARTZO

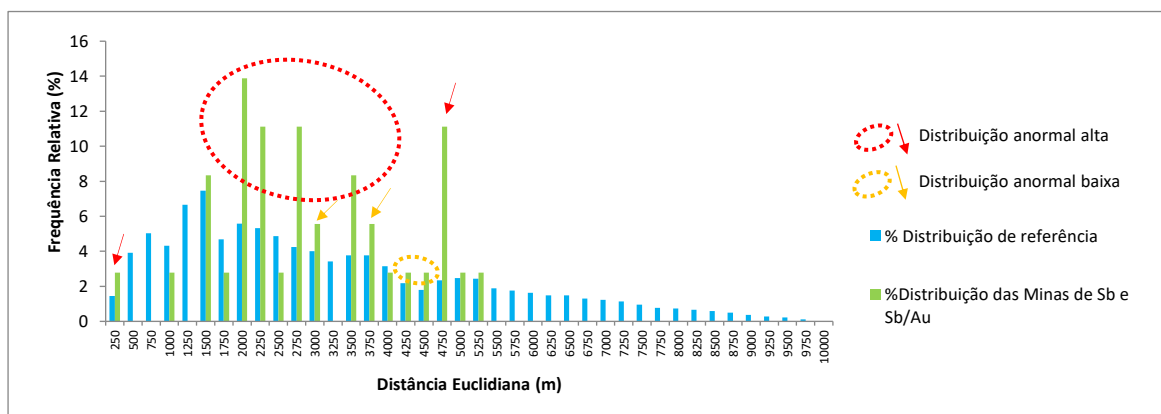
A distribuição espacial das minas de antimónio e antimónio-ouro está compreendida entre 205-5092 m e a distribuição dos pontos de referência estende-se entre 0-9690 m. As minas de antimónio e antimónio-ouro encontram-se a uma distancia média de 2672 m dos filões de quartzo (Figura 67).

As classes de distância [0,250[; [1750,2000[; [2000,2250[; [2500,2750[; [3250,3500[; e [4500,4750[ mostram que a distribuição das minas é superior à distribuição de referência, representando 58% das minas da sua totalidade, com uma razão de distribuição compreendida entre 1,9 e 4,7.

Nas classes [2750, 3000[; [3500,3750[; [4000,4250[; [4250,4500[, a distribuição das minas corresponde ao tipo LAD, representando 19% das minas, com uma razão de distribuição compreendida entre 1,2 a 1,5.

A partir dos 5500 m, todas as minas apresentam valores de frequência menores que os pontos de referência.

Apenas 3% das minas se encontram a uma distância inferior a 250 m dos filões de quartzo. As restantes minas com uma distribuição anormal alta (55%) localizam-se entre 2000 a 4750 m dos filões.





## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na área em estudo foi possível concluir que os valores da suscetibilidade magnética de filões básicos encontram-se compreendidos entre 298,88 e 1658,75, evidenciando um comportamento paramagnético a ferromagnético, contrariamente às rochas encaixantes que apresentam sempre valores indicativos de um comportamento paramagnético. Este método mostrou-se particularmente interessante para a caracterização dos filões básicos, pois mesmo em rochas muito alteradas, os filões apresentam sempre valores de suscetibilidade que se destacam do encaixante.

O levantamento magnético possibilitou constatar a existência de dois alinhamentos no norte da área de estudo (Lagoa Negra – Rates) de orientação NW-SE, aproximadamente N160°, compatível com uma estrutura associada a mineralização de ouro e antimónio.

Comparando, os dois distintos métodos geofísicos, o uso de um suscetibilímetro e de um magnetómetro, foi possível verificar que as suas aplicações são distintas. A medição da suscetibilidade magnética com o suscetibilímetro é útil para medições em contacto com o afloramento, permitindo a caracterização magnética das litologias localmente e à superfície. As medições realizadas com o magnetómetro permitem compreender a variação do campo magnético, e a influência de estruturas magnéticas não aflorantes e a uma escala regional.

As análises estatísticas sobre a distribuição espacial das ocorrências de filões básicos e antigas minas de antimónio, a DNN, mostrou que os filões e as minas de antimónio na área de estudo estão colocados segundo uma distribuição *cluster*. Comparando as duas razões R é possível concluir que as minas de antimónio (0,55) apresentam um grau de agrupamento, diminutamente, maior que os filões básicos (0,59).

A análise de distância entre características geológicas corroborou uma relação espacial entre minas de antimónio e antimónio-ouro e filões básicos, bacias anómalas de antimónio e filões básicos.

Estes resultados mostraram que esta metodologia de análise poderá ser importante na prospeção de novos recursos.



## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bettencourt, A. M. S. *et al.*, 2005. The Entre-Douro-e-Minho landscape since middle of III to the end of II millennia BC, collective project with the reference (POCTI/36527/HAR/2000). Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT);
- Breiner, S., 1999. Applications Manual for Portable Magnetometers. Geometrics, 2190 Fortune Drive, San Jose, California;
- Buttermann, W.C. & Carlin, J.F., 2004. Mineral Commodity Profiles: Antimony. U.S. Geological Survey;
- Carranza, E.J.M., 2009a. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*, Volume 35, 383-400pp.
- Carranza, E.J.M., 2009b. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, Volume 11, 351pp.
- Carranza, E.J.M., 2011. Geocomputation of mineral exploration targets. *Computer & Geoscience*, Volume 37, 1907-1916pp.
- Carta Geológica de Portugal. Escala 1:50 000. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
  - 9A- Póvoa do Varzim (Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1965);
  - 9C – Porto (J. Carrington da Costa, Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros, 1957);
  - 9D- Penafiel (A. Medeiros, Eurico Pereira e Armando Moreira, 1981);
  - 13B-Castelo de Paiva (A. Cândido de Medeiros. Revisão Por Carlos Teixeira, 1963);
  - 14 A – Lamego (Carlos Teixeira, A. Cândido de Medeiros e A. Peinador Fernandes, 1968);
  - 14 C – Castro D'Aire (L. J. G. Schermerhorn, D. Sluijk, J. Ávila Martins, A. Peinador Fernandes e J. M. Farinha Ramos, 1977).
- Carta Geológica de Portugal 1: 200.000. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa. Folha nº1 (Pereira et al, 1989) e 2 (Pereira et al, 2001).
- Boots, B.N, Getis, A., 1988. Point Pattern Analysis, Sage University Scientific Geography Series no. 8, Sage Publications, Beverly Hills.
- Carmichael, R. S., 1982. Handbook of physical properties of rocks, Universidade do Minnesota, CRC Press,. Volume 2, 360pp.ISBN0849302277, 9780849302275.

- Carneiro, E., & Santos, R., 2003. Análise Espacial Aplicada na Determinação de áreas de risco para algumas doenças endêmicas, no Bairro de Campo Limpo – Feira de Santana(Bahia), Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santa, 51-75pp.
- Carvalho, A.D., 1981. Recuperação de antigas explorações mineiras. Congresso 81 da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, 1–9pp.
- Correia, F. G., 2015. Prospeção Magnética na área envolvente da Mina de Terramonte. Universidade de Aveiro;
- Correia, R., 2011. Influência das propriedades petrofísicas na fragmentação de rochas graníticas por detonação com explosivos, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 77pp. (Tese de Mestrado).
- Couto, H., Roger, G., Móelo, Y. & Bril, H., 1990. Le district à antimoine-or Durico Beirão (Portugal): évolution paragénetique et géochimique; implications métallogéniques. Mineralium Deposita, Berlin, 25, Suppl: 69-81pp.
- Couto, H., 1993. As mineralizações de Sb-Au da região Dúrico-Beirã. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 607 p;
- Couto, H., Borges, F. S., 2007. Late Palaeozoic orogenic gold-antimony deposits from the Dúrico-Beirã area (North Portugal) and their relation with hidden granitic apexes, Proceeding of the ninth biennial meeting of the society for Geology applied to mineral deposits, Dublin, Ireland, 608 – 612.
- Cruz, I., Campos, V., Sistemas de informações geográficas aplicados à análise espacial em transportes, meio ambiente e ocupação do solo, Instituto Militar de Engenharia (IME);
- Dentith, M. & Mudge, S. ,2014. Geophysics for the mineral exploration geoscientist, Cambridge University Press, 1ªEd., 516pp.ISBN 978-0-521-80951-1.
- Deveaud, S., Gumiaux, C., Gloaguen, E., Branquet, Y., 2013. Spatial statistical analysis applied to rareelement LCT-type pegmatite fields: an original to constrain faults-pegmatites-granites relationships. Journal of Geosciences, Volume 58, 163-182pp.
- Diggle, P., J., 1983. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns. Mathematics in Biology, Academic-Press, London, Volume 2.
- Documentos de Estatística Espacial do Observatório das Metrópoles: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia.



- Documentos unidade curricular Sistemas de Informação Geográfica 2014/2015 da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto - [https://sigarra.up.pt/fcup/pt/conteudos\\_geral.ver?pct\\_pag\\_id=1011118&pct\\_parametros=pv\\_ocorrendia\\_id=355009](https://sigarra.up.pt/fcup/pt/conteudos_geral.ver?pct_pag_id=1011118&pct_parametros=pv_ocorrendia_id=355009);
- Dunlop, D. J. & Ozdemir, O., 1997. Rock Magnetism: Fundamentals and frontiers, Cambridge University Press, 595pp. ISBN 0521 32514 5.(Dunlop & Ozdemir, 1997)
- Freitas, R., 2010. Caracterização Magnética de Nanopartículas em Matrizes Amorfais, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, 90pp.(Tese de Mestrado).(Freitas, 2010)
- Gumiel, P., & Arribas, A., 1987, Antimony deposits in the Iberian Peninsula: Economic Geology, Volume 82, 1453- 1463 pp.
- Gumiel, P., 1982. Metalogenia de los yacimientos de antimonio de la península Iberica, Univ. Salamanca, 324 pp. (Tese de Doutoramento).
- Hermes, D., 1964. A quantitative petrographic study of dolerite in the deep river basin North Carolina, Dept. of Geology, University of North Carolina, ChaPel Hill. North Carolina,1718-1729pp.
- Ibrahim, A., & Bennett, B., 2014. Point-based Model for Predicting Mineral Deposit Using GIS and Machine learning, First International Conference on Systems Informatics, Modelling and Simulation, 65-70pp.
- Imhmed, S., 2012. Application of magnetic susceptibility measurements to oilfield scale managementInstitute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, 156 pp.(Tese de Doutoramento).
- Instituto Geológico e Mineiro, 2000. Portugal - Indústria Extractiva. Versão Online no site do LNEG [http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes\\_online/diversos/ind\\_extractiva](http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/ind_extractiva);
- Jesus, A. M., 1928, Minerais de Portugal. Composto e Impresso nas oficinas da Secção de Publicidade do Museu Comercial. R. do Quelhas 6-A, Lisboa;
- Johannsen, A., 1927. On the Use of the Terms "Diabase" and "Dolerite", The Journal of Geology, Vol. 35, No. 3, 270-275pp.
- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A., Conde, L., 1974. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares, IGME, 94pp.
- Kearey, P., Brook, M., Hill, I., 2002. An Introduction to Geophysical Exploration, Blackwell Science Ltd, 3rd Ed., 281pp.

- Lanza, R. & Meloni, A., 2006. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 287pp. ISBN-10 3-540-27979-2.
- Leal, S., Moura, R., Lima, A., Pivtorak A., 2016. Geophysics in gold exploration some applications to Northern Portugal Gold Deposits, 16 th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016.
- Lotze, F., 1945. Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta, Geotektonische Forschungen, 6 Ed., 78-92pp. Traduzida para o castelhano por J.M. Ríos, 1950. Observaciones respect a la division de los variscides de la Meseta Ibérica, Publicaciones Extranjeras sobre la Geología de España, 5 Ed, 149-166pp.
- Lourenço, A., Couto, H., 2011. Viagens no Tempo- Dos mares das trilobites ao ouro explorado pelos romanos, 79pp., Universidade do Porto. Lourenço
- Lowrie, W., 2007. Fundamentals of Geophysics Cambridge University, Press, 2ª Ed., 393pp. ISBN-13 978-0-511-35447-2.
- Moura, A. & Velho, J. L., 2012. Recursos Geológicos de Portugal. Palimage, Volume 57, 1ª Ed, 17-24pp.
- Neiva, A.M.R., Andráš P., Ramos, J..M.F., 2008. Antimony quartz and antimony-gold quartz veins from northern Portugal, Ore Geology Reviews, Volume 34, 4ª Ed, 533-546pp.
- Notas da unidade curricular Geomagnetismo do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2009 - [webpages.fc.ul.pt/~ecfont/Geomag/gm\\_2011\\_eric2.docx](http://webpages.fc.ul.pt/~ecfont/Geomag/gm_2011_eric2.docx).
- Notícias Explicativas das Cartas Geológicas de Portugal. Escala 1:50 000. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
  - 9A- Póvoa do Varzim (Carlos Teixeira e A. Cândido de Medeiros. Estudos Petrográficos de C. Torre de Assunção, 50pp, 1965);
  - 9C – Porto (J. Carrington Da Costa e Carlos Teixeira, 38pp, 1957);
  - 9D- Penafiel (A. Cândido de Medeiros, Eurico Pereira e Armando Moreira, 46 pp, 1980);
  - 13B-Castelo de Paiva (A. Cândido de Medeiros. Estudos Petrográficos, por L. Pilar e A. P. Fernandes, 61pp, 1964);
  - 14 A – Lamego (Carlos Teixeira, A. Cândido de Medeiros e A. P. Fernandes. Estudos Petrográficos, por A. P. Fernandes, 67pp, 1969);
  - 14 C – Castro D'Aire (L. J. G. Schermerhorn, 39pp, 1980).

- Olsen, C., 2013. DeepGeoTech Magnetometer V2 Manual;
- Ortega, L., Oyarzun, R., Gallego, M., 1996. The Mari Rosa late Hercynian Sb-Au deposit, Western Spain, Mineralium Deposit, Volume 31, 172-187 pp.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D., Monteiro, J. H., 1979. Introduction à la Géologie Générale du Portugal, Serviços Geológicos de Portugal, 114 pp.
- Santos, P., 2013. Estudo da Suscetibilidade Magnética nos Solos da Extração Mineira de São Pedro da Cova, Universidade de Porto, Faculdade de Ciências, 161 pp. (Tese de Mestrado).
- Silva, S., 2013. Desenvolvimento de uma metodologia para realização de levantamentos magnéticos marinhos para deteção de objetos, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, 144pp. (Tese de Mestrado).
- Sloane, D.J., 1991. Some physical properties of dolerite, Tasmânia Department of resources and energy, 5pp.
- St'Ovaia, H., 2000. O maciço granítico pós-tectónico de Vila Pouca de Aguiar: estudo petro-estrutural e mecanismo de instalação Universidade de Porto, Faculdade de Ciências, 313pp. (Tese de Doutoramento).
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press, 2 Ed., 760pp. ISBN 0-521-32693-1 – ISBN 0-521-33938-3.
- Terraplus - Magnetic Susceptibility. KT-10 Plus S/C and KT-10R Plus S/C Magnetic Susceptibility/Conductivity Meters. <http://terraplus.ca/products/pdf/KT-10-Plus-SC.pdf> (consultado 5/02/2016).
- Unidade curricular Petrologia I: Descrição Petrográfica da rochas ígneas do Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea da Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- Wibowo, H., 2006. Spatial Data Analysis and Integration for Regional – Scale Geothermal Prospectivity Mapping, West Java, Indonesia; International Institute for Geo – information Science and Earth observation Enschede, The Netherlands, 105pp. (Tese de Mestrado).

## WEBGRAFIA

- Instituto Português do Mar e da Atmosfera, consultado dia 18/06/2016 (<http://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/geofisica/geomagnetismo/>).
- National Centers for Environmental Information – The World Magnetic Model, consultado dia 2/09/2016 (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>)

# ANEXOS

**Tabela 3 - Medições de Suscetibilidade recolhidas através do suscetibilímetro portátil no campo (K expresso em  $10^{-6}$  SI).**

Pontos GPS	Coordenadas		Medições										
	X	Y	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	Mínimo	Máximo
042	-8,493911	41,073024	163	173	187	194	178	155	167	152	171,13	111	204
043	-8,493990	41,073013	188	198	195	212	149	194	126	169	178,88	120	261
044	-8,494020	41,072978	228	138	139	135	159	162	178	230	171,13	111	0263
045	-8,494009	41,072880	336	340	272	323	314	290	326	271	309,00	258	475
046	-8,494074	41,072833	429	446	369	370	393	274	228	447	369,50	178	458
047	-8,494140	41,072785	479	385	501	439	278	412	466	368	416,00	207	551
048	-8,494187	41,072759	270	253	304	335	348	306	294	280	298,75	251	395
049	-8,494307	41,072759	328	284	356	300	373	319	281	229	308,75	160	470
050	-8,494423	41,072716	368	389	315	347	336	318	343	289	338,13	236	443
051	-8,495157	41,076611	371	283	366	337	348	393	323	280	337,63	279	445
052	-8,495205	41,076595	206	389	261	231	211	276	282	276	266,50	164	395
053	-8,495134	41,076520	606	444	356	423	234	214	267	207	343,88	189	633
054	-8,495085	41,076523	327	208	190	282	266	258	312	240	260,38	178	372
056	-8,458812	41,073643	200	209	192	166	161	135	169	179	176,38	98	261
057	-8,458814	41,073657	156	172	133	210	200	182	206	158	177,13	96	210
058	-8,451046	41,078486	098	167	172	119	69	141	105	196	133,38	26	245
059	-8,445551	41,082495	328	156	167	163	212	256	180	196	207,25	152	298
060	-8,445380	41,082551	59	53	146	58	71	109	70	49	76,88	32	172
061	-8,445319	41,082562	315	598	394	391	275	320	253	286	354,00	243	829

062	-8,445305	41,082646	723	424	450	361	527	397	390	420	461,50	250	752
063	-8,445246	41,082670	467	649	619	766	242	357	247	320	458,38	211	1120
064	-8,445184	41,082767	90	157	101	141	170	109	101	142	126,38	89	171
065	-8,438698	41,078046	39	153	180	66	164	58	63	122	105,63	27	22
065	-8,438697	41,078046	513	412	506	490	313	383	359	570	443,25	614	283
065	-8,438695	41,078046	94	53	63	63	94	71	55	56	68,63	30	94
066	-8,437486	41,078765	205	272	170	225	286	232	262	339	248,88	95	358
067	-8,437485	41,078738	571	498	655	608	653	678	468	444	571,88	326	1,09
069	-8,474919	41,107266	360	513	601	484	351	429	405	541	460,50	329	763
070	-8,474721	41,107182	1860	1710	1710	1930	1240	1640	1490	1690	1658,75	1240	2330
071	-8,473488	41,106389	204	226	198	197	220	235	294	274	231,00	147	310
072	-8,473448	41,106504	154	96	98	148	142	118	129	145	128,75	75	175
073	-8,471029	41,101184	508	503	253	197	365	332	303	335	349,50	197	56
074	-8,471025	41,101183	175	150	172	131	138	148	160	136	151,25	129	185
075	-8,471011	41,101210	256	255	342	265	231	393	322	327	298,88	208	352
076	-8,471012	41,101212	146	152	135	143	166	113	166	166	148,38	113	177
098	-8,496769	41,120737	92	42	84	86	96	88	62	81	78,8	25	109
099	-8,496764	41,120750	46	28	30	57	48	42	57	28	42,00	23	77
100	-8,496744	41,120760	385	279	366	262	357	273	300	296	314,75	242	387
101	-8,499173	41,127511	129	127	155	103	199	142	210	123	148,50	088	225
102	-8,499211	41,127492	336	510	310	498	308	800	449	685	487,00	304	857
103	-8,499317	41,127372	106	120	137	108	86	65	50	140	101,50	42	209
104	-8,496598	41,135341	143	180	240	254	111	186	226	207	193,38	72	264
105	-8,496606	41,135346	451	380	418	442	367	477	504	423	432,75	324	623
106	-8,496617	41,135352	251	195	165	170	262	283	212	255	224,13	105	299

107	-8,496627	41,135358	458	493	499	427	539	432	558	658	508,00	329	725
108	-8,496637	41,135365	250	288	277	270	255	28	254	255	266,13	249	299